

Procjena točnosti izravnog georeferenciranja bespilotne letjelice Matrice 210 RTK na primjeru jaruge Santiš (otok Pag)

Glavačević, Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:870950>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-25**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Sveučilišni diplomski studij Primijenjena geografija (jednopedmetni)

Katarina Glavačević

**Procjena točnosti izravnog georeferenciranja
bespilotne letjelice Matrice 210 RTK na primjeru
jaruge Santiš (otok Pag)**

Diplomski rad

Zadar, 2021.

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Sveučilišni diplomski studij Primijenjena geografija (jednopedmetni)

**Procjena točnosti izravnog georeferenciranja bespilotne letjelice
Matrice 210 RTK na primjeru jaruge Santiš (otok Pag)**

Diplomski rad

Studentica:

Katarina Glavačević

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Marić

Komentor:

Izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg

Zadar, 2021.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Katarina Glavačević**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Procjena točnosti izravnog georeferenciranja bespilotne letjelice Matrice 210 RTK na primjeru jaruge Santiš (otok Pag)** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 29. listopada 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Diplomski rad

PROCJENA TOČNOSTI IZRAVNOG GEOREFERENCIRANJA BESPILOTNE LETJELICE MATRICE 210 RTK NA PRIMJERU JARUGE SANTIŠ (OTOK PAG)

Katarina Glavačević

Sažetak

Nagli razvoj i povećana dostupnost različitih bespilotnih letjelica (UAVs) rezultirala je eksponencijalnom uporabom ovih sustava u brojnim znanstvenim poljima i djelatnostima. Struktura iz pokret (engl. *SfM*) s višestrukou stereo fotogrametrijom danas je polazna osnova za razvoj digitalnih ortofoto snimki (engl. *DOP*), digitalnih modela površina (engl. *DEM*) te drugih fotogrametrijskih proizvoda. Međutim, primjenjivost ovih modela uvelike ovisi o primjeni orijentacijskih točaka (engl. *Ground Control Point - GCP*). Budući da prikupljanje OT-a zahtjeva korištenje totalnih stanica ili GNSS-RTK prijemnika, ovi postupci u pravilu oduzimaju mnogo vremena. Izvođenje fotogrametrijskog procesa bez korištenja OT-a naziva se izravno georeferenciranje i danas postaje sve popularnija metoda. U ovom radu su testirana tri načina rada izavnog georeferenciranja koristeći sustav *Matrice 210 RTK V2* i *D-RTK2* mobilnu antenu. Označavanjem kontrolnih točaka na terenu ($n=10$) te smještajem odabranih testnih objekata unutar jaruge Santiš izvršena je procjena apsolutne i relativne točnosti testiranih načina rada RTK pozicioniranja. Utvrđeno je da dva (CROPOS i Stonex S10 korekcija) od tri testirana načina imaju apsolutnu centimetarsku točnost. Sva tri testirana načina RTK pozicioniranja imaju relativnu centimetarsku točnost. Nadalje, utvrđeno je da su visinske razlike između DEM-ova izvedenih izravnim georeferenciranjem te referentnog modela veće na raščlanjenijem terenu. Ovim radom je utvrđeno da se testirani UAV sustav za izravno georeferenciranje može koristiti u širokom spektru geografskih znanosti i drugih disciplina gdje se zahtjeva apsolutna i relativna centimetarska točnost različitih modela.

Ključne riječi: Apsolutna točnost, bespilotna letjelica, D-RTK 2, izravno georeferenciranje, jaruga Santiš, Matrice 210 RTK V2, relativna točnost, UAV fotogrametrija

Voditelji: doc. dr. sc. Ivan Marić, izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg (komentor)

Povjerenstvo: doc. dr. sc. Mateo Gašparović, doc. dr. sc. Ivan Marić, doc. dr. sc. Denis Radoš

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zadar

Department of Geography

Graduation thesis

ACCURACY ASSESSMENT OF DIRECT GEOREFERENCING FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE MATRICE 210 RTK ON CASE STUDY OF GULLY SANTIŠ (ISLAND OF PAG)

Abstract

Rapid development and increased availability of unmanned aerial vehicle (UAVs) resulted in exponential use of these systems in many science fields and activities. The *Structure from Motion (SfM)* with multi-view stereo photogrammetry today is starting point for research of digital orthophotos (DOF), digital elevation models (DEM) and other photogrammetric products. However, the application of these models depends largely on the application of ground control points (GCP). Since collecting GCPs requires the use of total stations or GNSS-RTK receivers, these procedures generally take up a lot of time. Deriving a photogrammetric process without using GCPs is called direct georeference and today it is becoming an increasingly popular method. In this paper we tested three methods of direct georeferencing using the system of the *Matrice 210 RTK V2* and *D-RTK 2* mobile antenna. Marking checkpoints in the field (n=10) and placing selected test facilities in gully "Santiš", was performed an assessment of the absolute and relative accuracy of the tested RTK positioning. We established that two (CROPOS and Stonex S10 correction) of the three tested RTK methods has absolute centimeter accuracy. Therefore it is determined that the altitude between digital elevation model (DEM) derived by direct georeferencing and a larger reference model on more fragmented terrain. In this work it is determined that the tested UAV system for direct georeferencing can be used in a wide range of geographical sciences and other disciplines where absolute and relative centimeter accuracy of different models is required.

Keywords: Absolute accuracy, direct georeferencing, D-RTK 2, gully Santiš, Matrice 210 RTK V2, relative accuracy, UAV photogrammetry, unmanned aerial vehicle (UAV)

Supervisor: Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Associate Professor Ante Šiljeg, PhD

Reviewers: Assistant Professor Mateo Gašparović, PhD, Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Assistant Professor Denis Radoš, PhD

SADRŽAJ

Predgovor.....	5
1. UVOD.....	6
1.2. Objekt, ciljevi i svrha istraživanja.....	9
1.3. Hipoteze istraživanja.....	10
1.4. Prostorni obuhvat istraživanja.....	12
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	14
3. TEORIJSKA OSNOVA.....	18
3.1. Razvojne faze fotogrametrije.....	18
3.1.1. Grafička fotogrametrija.....	18
3.1.2. Analogna fotogrametrija.....	19
3.1.3. Analitička fotogrametrija.....	21
3.1.4. Digitalna fotogrametrija.....	23
3.1.4.1. Izravno georeferenciranje (engl. direct georeferencing).....	25
3.2. Matrice 210 RTK V2.....	28
3.2.1. Kamera Zenmuse X7.....	31
3.2.2. D-RTK 2 Mobilna Stanica.....	32
4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	35
4.1. Spajanje UAV-a sustava.....	35
4.1.1 Montiranje D-RTK 2 mobilne stanice.....	35
4.1.1.1 D-RTK 2 - BAZNA STANICA.....	37
4.1.1.2 D-RTK 2 - KOREKCIJA KOORDINATA - BAZNA STANICA TREĆE STRANE.....	38
4.1.1.3 MREŽNE NTRIP KOREKCIJE - CROPOS.....	40
4.2. Označavanje orijentacijskih točaka.....	45
4.3. Prikupljanje orijentacijskih i kontrolnih točaka.....	48
4.4. Obrada UAV snimki.....	49
4.4.1 Provjera kvalitete fotografija.....	50
4.4.2 Postavke točnosti kamere.....	50
4.4.3 Spajanje fotografija.....	51
4.4.4 Gradualna selekcija.....	52
4.4.5 Dodavanje orijentacijskih (OT) i/ili kontrolnih točaka.....	53
4.4.6 Izgradnja gustog oblaka točaka.....	54

4.4.7 Izvođenje fotogrametrijskih modela.....	54
5. REZULTATI I RASPRAVA.....	55
5.1. Orijehtacijske (OT) i kontrolne (CP) točke	55
5.2 Fotogrametrijski modeli - klasičan pristup	57
5.2.1 Klasičan pristup (10 OT)	57
5.2.2 Klasičan pristup (6 OT, 4 CP)	57
5.2.3 GNSS prijamnik UAV-a.....	57
5.3 Izravno georeferenciranje - modeli.....	60
5.3.1 D-RTK 2 - bazna stanica	60
5.3.2 D-RTK 2 - korekcija STONEX S10.....	63
5.3.3 Mrežne NTRIP korekcije - CROPOS.....	64
5.4 Apsolutna točnost testiranih načina RTK pozicioniranja	66
5.5 Relativna točnost modela izvedenih izravnim georeferenciranjem	71
5.6 Mogućnosti primjene izravnog georeferenciranja	73
5.7 Savjeti u procesu izvođenja izravnog georeferenciranja	76
6. ZAKLJUČAK.....	78
7. LITERATURA	79
8. IZVORI.....	88
Popis grafičkih priloga.....	89
Popis tabličnih prikaza.....	90

Predgovor

Suvremeni aspekt primijenjene geografije danas je temeljen na implementaciji geoprostornih tehnologija, predstavljajući time izuzetnu važnost u znanosti. Kompleksna geografska znanja o istaknutim specifičnim problemima uz primjenu napredne tehnologije, omogućavaju vrlo široku primjenu geografije. U tom kontekstu primijenjena geografija stvara ključne temelje za rješavanje mnogih suvremenih društvenih, ekonomskih i ekoloških problema na lokalnoj i globalnoj razini.

Želim se zahvaliti svim ljudima čija je pomoć bila prekretnica u završetku ovog diplomskog rada. U prvom redu želim se zahvaliti mentoru doc. dr. sc. Ivanu Mariću i komentoru izv. prof. dr. sc. Anti Šiljegu, bez čije stalne podrške, pomoći i odličnog vodstva, ovaj diplomski rad ne bi bio ostvaren. Zahvalna sam na neprocjenjivom iskustvu i pružanju prilike za profesionalni i osobni razvoj. Bila mi je izrazita čast i zadovoljstvo za diplomski rad imati ovakvo istraživanje.

Želim se posebno zahvaliti komentoru izv. prof. dr. sc. Anti Šiljegu na prenesenom znanju tijekom studija, usmjeravanju, velikoj inspiraciji i motivaciji za bavljenjem ovim aspektom geografije. Iznimno sam zahvalna na dijeljenju stručnosti, pružanju iskrenog i dragocjenog vodstva te velikog poticaja.

Izuzetno sam zahvalna mentoru doc. dr. sc. Ivanu Mariću na sugestiji i velikoj motivaciji prilikom odabira teme te pisanju rada. Hvala na velikom strpljenju, razumijevanju, požrtvovnošću i entuzijazmu. Hvala na brojnim savjetima, bezuvjetnoj i ustrajnoj pomoći, nesebičnom dijeljenju znanja te velikom usmjeravanju i poticanju tijekom cijelog procesa pisanja rada. Hvala na inspiraciji, suradnji i izvrsnom vodstvu.

Veliko hvala svim mojim prijateljima na nevjerojatnoj podršci, brojnim savjetima tijekom studiranja, a napose prilikom pisanja ovog rada. Također, hvala prijateljima i na svim druženjima te divnim uspominama.

Na kraju, ništa od ovoga ne bi bilo moguće bez moje obitelji. Najveće hvala mojoj obitelji na neprekidnoj podršci i kontinuiranom ohrabrenju tijekom studiranja, kao i kroz proces istraživanja i pisanja ovog diplomskog rada. Hvala mami Ljubici i tati Mirku. Hvala sestri Ani Mariji i bratu Mirku. Hvala baki Kati. Ovaj diplomski rad dokaz je vaše ljubavi i pažnje, koju mi bezuvjetno pružate u životu, na čemu sam vam zauvijek zahvalna.

1. UVOD

Poznavanje točnih informacija o Zemljinoj površini oduvijek je imalo ključnu ulogu u razvoju znanstvenih disciplina i djelatnosti (Guptill i Morrison, 1995, Turnbull, 1996, Lechthaler, 2007, Šiljeg i dr., 2018). Navedeno je osobito izraženo u kontekstu primijenjene geografije (Pacione, 2011) čiji je zadatak analiziranje širokog spektra okolišnih, ekonomskih i društvenih problema te formuliranje odgovarajućih odgovora (Pacione, 2011). Dobivanje pouzdanih informacija o značajkama različitih elemenata u prostoru primarno se temelji na razvoju suvremenih geoprostornih tehnologija¹ (engl. *geospatial technologies* - GST) (Schenk, 2005, Linder, 2009). Posljednjih desetljeća ubrzan tehnološki napredak je revolucionarizirao metode izmjere (Smith i dr., 2016) te unaprijedio mogućnosti kvantificiranja reljefa i drugih prirodnih i umjetnih elemenata prostora (Florinsky, 2017). Točno, precizno i brzo prikupljanje topografskih podataka postaje temelj ne samo fizičke geografije (Smith i dr., 2016), već i drugih, njoj bliskih znanosti i poddisciplina (Pike i dr., 2009). U tom kontekstu, zračna i terestrička fotogrametrija postaje dominantna tehnologija u proučavanju različitih prostorno-vremenskih promjena (D'Oleire-Oltmanns i dr., 2012, Gonçalves i Henriques, 2015, Liu i dr., 2016, Peternel i dr., 2017, Cook, 2017, Laporte-Fauret i dr., 2019, Jaud i dr., 2019, Groos i dr., 2019, Meinen i Robinson, 2020, Zanutta i dr., 2020, Burdziakowski i dr., 2020, Conforti i dr., 2021). Fotogrametrija je grana daljinskih istraživanja (engl. *remote sensing*) koja se definira kao umjetnost, znanost i tehnologija dobivanja pouzdanih informacija o fizičkim objektima i okolišu kroz proces snimanja, mjerenja i analiziranja zračnih i terestričkih fotografija (ASPRS², 2009). Riječ *fotogrametrija* je prvi put upotrijebio Albrecht Meydenbauer 1867. godine u svom djelu *Die Photometrographie* (Albertz, 2007), a dolazi od grčkih riječi *phos* ili *phot* (svjetlost), *grama* (crtanje) te *metrein* (mjerenje), označavajući mjerenje ili crtanje svijetlom (Awange i Kiema, 2013, Coulombe, 2016). Razvojem digitalnih kamera, početkom 1990-ih, fotogrametrija doživljava novu revoluciju (Dlesk i dr., 2020). Potpuna digitalizacija procesa profilirala je novu fazu razvoja - digitalnu fotogrametriju (Konecny, 2003, Schenk, 2005, Linder, 2009). Ovu fazu obilježava razvoj najnaprednijih tehnika i alata za obradu fotografija (Konecny, 2003, Schenk, 2005, Linder, 2009). Temeljni zadatak svih fotogrametrijskih tehnika je izvođenje geometrijskih značajki (oblik, dimenzije i položaj) određenog objekta ili scene (Dittrich i dr., 2017, Agüera-Vega i dr., 2018). Danas je veoma

¹ Geoprostorne tehnologije (GST) se mogu promatrati kao skup tehnologija (GIS, daljinska istraživanja, GPS) koji omogućuje modeliranje kompleksnih procesa i oblika različite razine detaljnosti ovisno o svrsi istraživanja (Marić i dr., 2019).

² *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) - Američko društvo za fotogrametriju i daljinska istraživanja, osnovano 1934. godine.

popularna fotogrametrijska tehnika struktura iz pokreta (SfM) (*Structure from Motion*) (Burns i dr., 2015, Tonkin i dr., 2016, Morgan i dr., 2017, Agüera-Vega i dr., 2018, Iglhaut i dr., 2019, James i dr., 2019, Alonzo i dr., 2020, Child i dr., 2021) koja je *demokratizirala 3D topografsko istraživanje nudeći brzo prikupljanje 3D oblaka točaka uz minimalne troškove* (Smith i dr., 2016, 3, Anderson i dr., 2019). SfM je inovativna fotogrametrijska tehnika koja u procesu izvođenja topografskih podataka koristi niz preklapajućih fotografija snimljenih iz različitih položaja, a temelji se na algoritmima računalnog vida (npr. SIFT³) s ciljem ubrzanja digitalnog fotogrametrijskog tijeka rada (Anderson i dr., 2019). SfM postaje osnova prikupljanja prostornih podataka unutar disciplina zaštite okoliša i geoznanosti (Anderson i dr., 2019), mijenjajući postojeću paradigmu fotogrametrije prema kojoj se podatci prikupljaju od strane različitih organizacija koje imaju pristup skupoj opremi. Nova paradigma je da znanstvenici sada postaju vlastiti proizvođači prostornih podataka (Garrett i Anderson, 2018). Posljednjih godina, dobivanje visokorezolucijskih topografskih modela kroz primjenu bespilotnih zračnih letjelica (UAV⁴) (Aziz i dr., 2014, Masiero i dr., 2017, Stott i dr., 2020) te SfM tehniku, je značajno ubrzalo fotogrametrijski proces (Masiero i dr., 2017, Esposito i dr., 2017, Stott i dr., 2020, Anders i dr., 2020). UAV, zbog svoje jednostavne primjene i sve manjih cijena, postaju toliko popularni i globalno dostupni da je za razdoblje od posljednjih nekoliko godina skovan termin „doba dronova“ (Economist, 2015). Naime, sve manje cijene bespilotnih zračnih sustava (sUAS⁵), u kombinaciji s pojavom besplatno dostupnih softverskih rješenja, izaziva sve veći interes za modeliranje površina temeljno na fotografijama (engl. *image-based*). Međutim, dominaciju sUAS/SfM fotogrametrije ograničava potreba za označavanjem i prikupljanje orijentacijskih točaka (OT) (engl. GCP⁶) koristeći kvalitetne i skupe GNSS prijamljke (Carbonneau i Dietrich, 2016). OT *su točke koje se može identificirati na fotografiji, s koordinatama određenim u službenom koordinatnom sustavu, a glavna svrha im je povezivanje bloka aerotriangulacije (AT)⁷ s referentnim koordinatnim sustavom* (DGU, 2017). Geometrijska točnost topografskih podataka izvedenih pomoću sUAS i SfM ovisit će o vrsti misije, prednjem i bočnom preklopu fotografija, rezoluciji senzora, kalibraciji kamere (Sanz-Ablanedo i dr., 2018), a primarno o točnosti prikupljenih OT. OT služe za georeferenciranje,

³ Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) služi za pronalazak i opisivanje lokalnih značajki neke slike. SIFT ima velike mogućnosti kod trodimenzionalnog rekonstruiranja scene i uparivanja tj. prepoznavanja. Najvažnije svrhe su mu u robotici te spajanju fotografija (Hrga, 2018).

⁴ Unmanned Aerial Vehicle

⁵ Unmanned Aerial Systems

⁶ Ground control point (GCP)

⁷ Blok-aerotriangulacija je metoda određivanja elemenata vanjske orijentacije snimki, orijentacijskih i stalnih geodetskih i međnih točaka iz fotogrametrijskih mjerenja (NN 55/2001).

redefiniranje kalibracijskih parametara kamere i uklanjanje artefakata iz modela (Carbonneau i Dietrich, 2016). Točnost OT-a u konačnici određuje kvalitetu modela (Tahar, 2013; Aziz i dr., 2014, Oniga i dr., 2018). Na rezultate utječe broj i distribucija orijentacijskih točaka što je predmet brojnih znanstvenih istraživanja (Tahar, 2013, Aziz i dr., 2014, Mian i dr., 2015, James i dr., 2017, Esposito i dr., 2017, Masiero i dr., 2017, Agüera-Vega i dr., 2018, Nagendran i dr., 2018, Martínez-Carricondo i dr., 2018, Oniga i dr., 2018, Sanz-Ablanedo i dr., 2018, Stott i dr., 2020, Przybilla i dr., 2020). Općenito se smatra da povećanje broja OT-a rezultira boljom točnošću modela (Oniga i dr., 2018). Međutim, prikupljanje OT-a mora biti izvedeno primjenjujući skupe, geodetske GNSS prijavnike što je financijski i vremenski zahtjevno i može usporiti širu prijemnu sUAS fotogrametrije (Carbonneau i Dietrich, 2016). Nadalje, OT je potrebno označiti i izmjeriti prema optimalnom rasporedu što može biti izrazito dugotrajan i skup proces. Točnost modela će u konačnici ovisiti o broju i rasporedu OT-a (Sanz-Ablanedo i dr., 2018). U kontekstu prostorno-vremenskih analiza javljaju se dodatni problemi koji proizlaze iz činjenice da se OT uslijed površinskih deformacija ili vremenskih uvjeta mogu pomicati ili nestati. U konačnici, veliko ograničenje ovog klasičnog pristupa zračne fotogrametrije proizlazi iz činjenice da ponekad nije moguće ostvariti optimalan raspored OT-a zbog ratnih, sigurnosnih ili praktičnih razloga (npr. klizišta, poplavna, zaleđena ili močvarna područja, itd.) (Zhang i dr., 2019). Dakle, iako je klasičan način izvođenja zračne fotogrametrije prepoznat kao najvažnija metoda prikupljanja podataka u izradi topografskih karata ona ima očite nedostatke u dugom vremenu proizvodnje, neučinkovitosti i ovisnosti o orijentacijskim točkama itd. (Yuan i Zhang, 2008). Međutim, novo ubrzanje fotogrametrijskog procesa dolazi s pojavom izravnog georeferenciranja (IG) (engl. *direct georeferencing* – DG) (Yuan i Zhang, 2008, Bláha i dr., 2011, Tanathong i Lee, 2010, Rehak i dr., 2013, Rabah i dr., 2018). IG metoda ne zahtijeva prikupljanje OT i aerotriangulaciju (AT) u procesu izvođenja modela iz zračnih snimki (Rizaldy i Firadus, 2012, Rabah i dr., 2018). IG predstavlja fotogrametrijski proces u kojem se modeliranje temelji na izravnom mjerenju šest parametara vanjske orijentacije (engl. *exterior orientation* - EO), odnosno položaju (X, Y i Z) kamere kojeg mjeri GNSS prijavnik te orijentaciji/nagibu kamere (*pitch, roll i yaw*)⁸ kojeg mjeri inercijalna mjerna jedinica (engl. IMU⁹), u vremenu prikupljanja fotografije (engl. *real-time*) (Turner i dr., 2013, ASPRS, 2009, Rizaldy i Firadus, 2012, Carbonneau i Dietrich, 2016). Međutim, izostanak OT predstavlja značajan izazov u pogledu procjene kvalitete modela.

⁸ Yaw, Pitch, Roll su kutovi nagiba koji definiraju rotaciju UAV-a u odnosu na njegov koordinatni sustav navigacije.

⁹ Inertial Measurement Unit (IMU) - je elektronski uređaj koji mjeri troosni kutni položaja i ubrzanje objekta.

Iako je posljednjih godina započeo razvoj financijsko-pristupačnijih sUAS platformi koji su sposobni proizvesti modele primjenjujući IG/sUAS pristup, točnost i prikladnost takvog pristupa kao punopravne metode topografskog snimanja trenutno nije dovoljno istražena (Carbonneau i Dietrich, 2016). Stoga se u ovom radu ispituje točnost IG pristupa koristeći popularnu sUAS (*Matrice 210 RTK V2/Zenmuse X7-16 mm/D-RTK2*) platformu. Naime, prema službenim specifikacijama, ortofoto snimke generirane sUAS (*Matrice 210 RTK V2/Zenmuse X7*) mogu postići apsolutnu horizontalnu točnost <5 cm koristeći *DJI Terra* softver za kartiranje. Ova razina točnosti odgovarala bi mjerilu 1: 500 (URL 1).

1.2. Objekt, ciljevi i svrha istraživanja

Objekt istraživanja diplomskog rada je metoda izravnog georeferenciranja (IG) izvedena pomoću bespilotne letjelice *Matrice 210 RTK V2* i mobilne stanice D-RTK 2. Svrha diplomskog rada se očituje u davanju smjernica u korištenju ove metode u kontekstu razine mjerila (rezolucije) prilikom izvođenja različitih primijenjenih istraživanja.

Glavni cilj istraživanja je nadograditi i proširiti znanstvene spoznaje o metodi izravnog georeferenciranja (IG), odnosno utvrditi točnost IG-a UAV sustava *Matrice 210 RTK V2 +D-RTK 2* pri različitim načinima RTK pozicioniranja. Ostvarenje glavnog cilja uvjetovalo je provođenje istraživanja u nekoliko koraka rezultirajući postavljanjem dodatnih sekundarnih ciljeva.

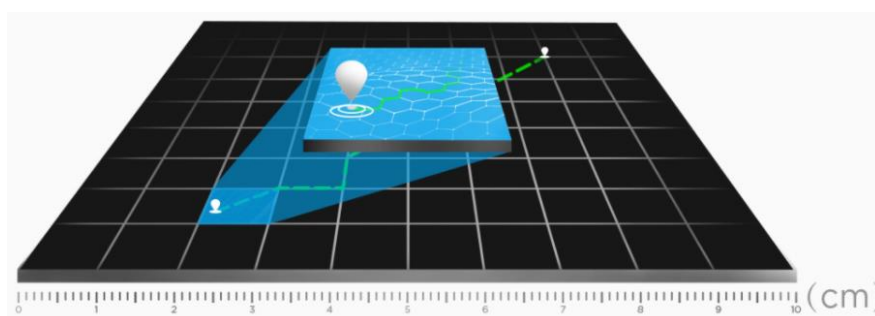
- 1) Označiti i izmjeriti orijentacijske (OT) i kontrolne točke unutar područja istraživanja;
- 2) Generirati aerofotogrametrijske proizvode primjenom klasičnog pristupa;
- 3) Generirati aerofotogrametrijske proizvode kroz različite načine RTK pozicioniranja;
- 4) Usporediti izvedene aerofotogrametrijske proizvode primjenom specifičnih metoda.

1.3. Hipoteze istraživanja

Iz postavljenih ciljeva istraživanja proizašle su sljedeće hipoteze:

- **H1** Ukupna pogreška jedne od tri testirane opcije RTK pozicioniranja UAV sustava (*Matrice 210 RTK V2 + D-RTK2*) na visini leta od 30 m u izmjerenim kontrolnim točkama (CP) bit će centimetarska (< 10 cm).

Agisoft Metashape je jedan od najpopularnijih fotogrametrijskih programa na svijetu čije modele i izvješća analizira velik broj znanstvenika iz različitih područja i polja. Nakon završetka fotogrametrijskog procesa *Agisoft* ima mogućnost generiranja izvješća koje korisnicima pruža detaljan uvid u projekt kroz detaljnu deskriptivnu statistiku. Naime, ako se u procesu koriste kontrolne točke za provjeru modela izvješće će između ostalog sadržavati statističku metriku ukupne pogreške (engl. *total error*) koja opisuje horizontalnu i vertikalnu točnost modela. Na službenim stranicama DJI-a navodi se da je D-RTK 2 nadograđeni visokoprecizni GNSS prijamnik koji podržava sve velike globalne satelitske navigacijske sustave, pružajući u stvarnom vremenu diferencijalne korekcije koji generiraju centimetarski precizne podatke o pozicioniranju za poboljšanje relativne točnosti¹⁰ (Slika 1).



Slika 1. Reklamiranje centimetarske razine točnosti pozicioniranja (URL 22)

Međutim, većina korisnika pri kupnji ovakvog i sličnih uređaja preispituje mogućnost primjene ovog sustava s ciljem postizanja što bolje apsolutne točnosti. Naime, u slučaju postizanja visoke apsolutne točnosti¹¹ u izvođenju snimanju UAV-om te u fotogrametrijskoj obradi izostala bi potreba označavanja, prikupljanja i korištenja orijentacijskih točaka (OT) što bi uvelike ubrzalo cijeli proces.

¹⁰ Relativna točnost se odnosi na točnost usporedbe elemenata ili značajki unutar rekonstruiranog modela. Primjerice, ako model zemljišnog pokrova prikazuje igralište dugo 100 m, a to je jednaka udaljenost kao u stvarnosti, model ima visoku relativnu točnost.

¹¹ Apsolutna točnost se odnosi na točnost rekonstrukcije u odnosu na njen pravi položaj unutar određenog koordinatnog sustava. Ako lokacija igrališta u rekonstruiranom modelu odstupa 30 metara od stvarne lokacije tad model ima nisku apsolutnu točnost i visoku relativnu točnost.

- **H2** Relativna pogreška sve tri opcije RTK pozicioniranja na testiranim objektima (pločice i laminati) smještenim unutar područja istraživanja bit će manja od 5% (engl. *percent error - PE*).

Za razliku od apsolutne točnosti koja je definirana razlikom između položaja neke točke ili elementa na rekonstruiranom modelu i njihovog pravog položaja unutar određenog koordinatnog sustava, relativna točnost se definira usporedbom pojedinih elemenata na rekonstruiranom modelu u odnosu na te elemente u stvarnosti. Primjerice, relativna točnost modela je velika ako dvije točke (npr. rubovi pločica) imaju istu udaljenost između njih na rekonstruiranom modelu, kao i u stvarnosti. S obzirom na to da se na stranicama DJI mobilna stanica D-RTK 2 reklamira kao uređaj koji generira *centimetarsku razinu točnosti pozicioniranja za unaprijedenu relativnu točnost* (URL 21) pretpostavlja se da će sve tri opcije RTK pozicioniranja na testiranim objektima imati PE <5%.

- **H3** Visinske razlike između digitalnih modela površina (engl. *digital surface models*) izvedenih izravnim georeferenciranjem te modela izvedenog klasičnim fotogrametrijskim pristupom bit će veće na izrazito jako raščlanjenom i zasjenjenom terenu.

Jedan od čestih izazova u topografskom modeliranju je pojava deformacija na vertikalno raščlanjenijem reljefu (Nesbit i Hugenholtz, 2019) i zasjenjenim područjima. Digitalni model površina izveden iz gustog oblaka točaka generiran primjenom odgovarajućeg broja orijentacijskih točaka će se promatrati kao referentni model. Visinske razlike između referentnog modela i modela izvedenih klasičnim pristupom utvrdit će se koristeći softverski paket *ArcGIS for Desktop*.

- **H4** Dodavanje manjeg broja OT-a u procesu izravnog georeferenciranja poboljšat će ukupnu točnost modela.

Načelno se smatra da dodavanje OT-a dovodi do poboljšanja točnosti kod modeliranja topografije (Martínez-Carricondo i dr., 2018). Przybilla i dr. (2020) navode da RTK-UAV sustavi mogu biti korišteni u primjenama koje zahtijevaju srednju razinu točnosti (> 2-4 cm) zbog značajnog smanjenja napora potrebnog za prikupljanje OT-a. Međutim, potrebno je koristiti bar jednu orijentacijsku točku kako bi dobili prihvatljive rezultate.

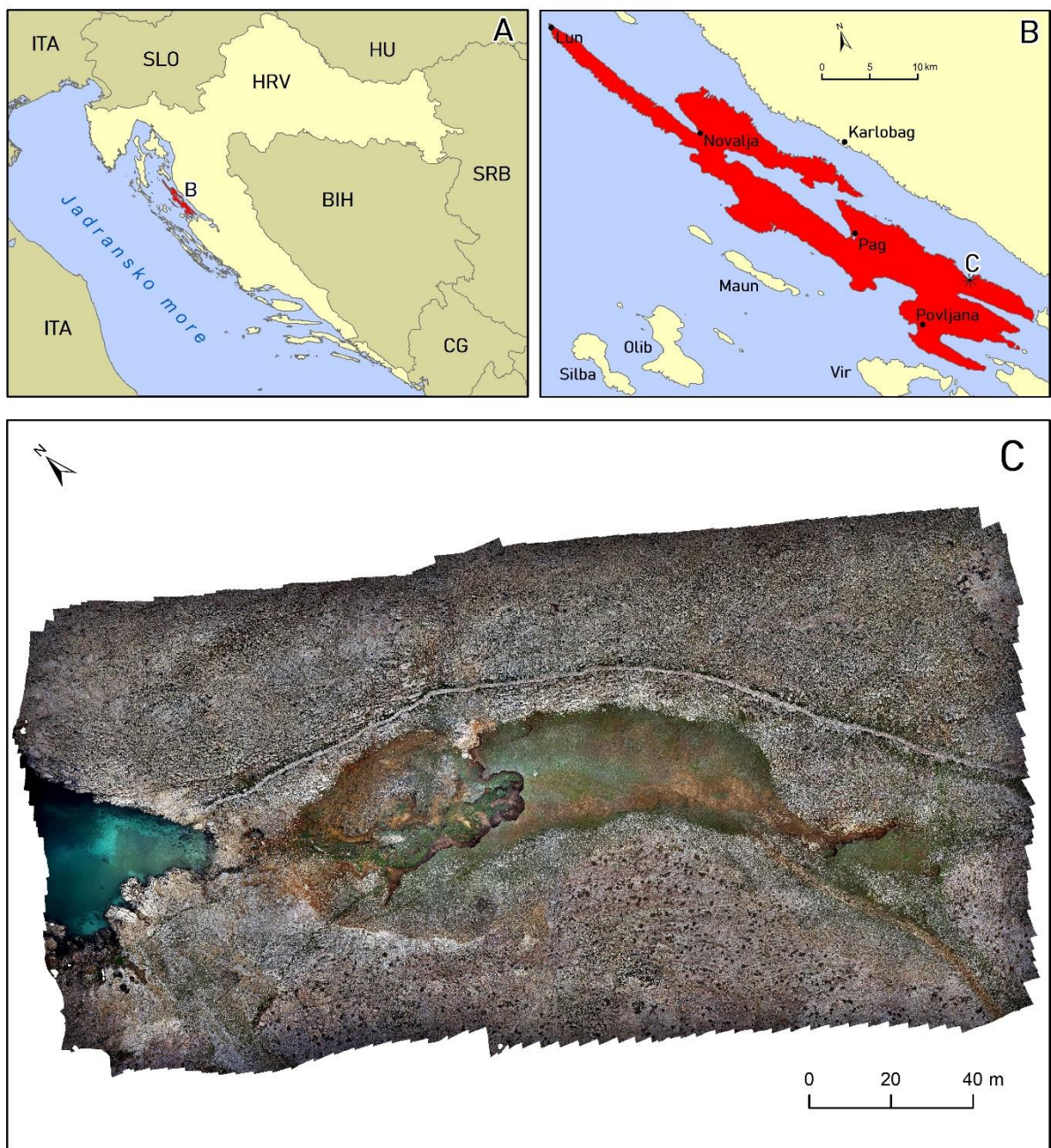
1.4. Prostorni obuhvat istraživanja

Prostor istraživanja usmjeren je na mikro razinu koja se odnosi na jarugu Santiš, smještenu na jugoistočnoj obali otoka Paga. Otok Pag (Slika 2B) je peti otok po veličini u Hrvatskoj s površinom od 284,18 km². Smješten u sjevernodalmatinskoj otočnoj skupini, omeđen Paškim kanalom na sjeveru, Velebitskim kanalom na istoku, Maunskim kanalom zapadu te Ninskim zaljevom na jugu. Karakterističnog je dinarskog pravca pružanja (SZ – JI). Odlikuje ga duga (302,47 km) i razvedena ($I_r= 4,50$) obala čime se svrstava među najrazvedenije Hrvatske otoke (Magaš, 2011).

Otokom dominiraju kredno-paleogenske karbonatne naslage vapnenca i dolomita te manji dijelovi paleogenskih flišnih i mlađih kvartarnih naslaga. Prevladavaju naslage vapnenca s mjestimičnim pojavama dolomita. Otok Pag se nalazi u području prijelaza eumediteranske i submediteranske zone sredozemne klime (*Csa – Cfa*). Prosječna godišnja temperatura zraka iznosi 15,5° C, a prosječna godišnja količina oborina iznosi između 1050 i 1106 mm.

Izrazita izloženost vjetrovima, posebice buri koja doseže orkanske jačine, popraćena je posolicom donoseći time brojne probleme za lokalnu vegetaciju. Ogoljeni krški krajolik i jaruge istaknuta su reljefna obilježja otoka Paga (Magaš, 2011). Uz litologiju, tektoniku te hidrologiju, klimatske prilike na prostorima srednjeg i južnog dijela otoka Paga, pogodovale su oblikovanju jaruga gdje je zabilježeno čak 337 jaruga (Lončar, 2009).

Jaruga Santiš (Slika 2C) nalazi se na JI obali otoka Paga uz zapadni dio rta Santiš. Jaruga je nastala na akumuliranom debelom smeđem tlu, čije su naslage sklone površinskom odnošenju materijala. Dimenzije jaruge Santiš iznose 80 x 15 m, s površinom od 1163 m² te drenažnim bazenom površine od 0,18 km² (Šiljeg i dr. 2021)..



Slika 2. (A) Smještaj otoka Paga u RH; (B) smještaj jaruge Santiš na otoku Pagu te (C) visokorezolucijski DOF snimka jaruge Santiš

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Iako metoda IG-a postaje sve popularnija tema u kontekstu izvođenja zračne fotogrametrije ona na globalnoj razini, zbog naglog razvoja UAV tehnologije, još uvijek nije dovoljno istražena. U nastavku je pružen pregled istraživanja koja su se najviše koristila prilikom pisanja ovog diplomskog rada. Istraživanja su podijeljena u tri grupe: (a) radovi koji obrađuju procjenu točnosti IG-a različitih sUAS; (b) radovi koji obrađuju problematiku utjecaja korisničko-definiranih parametara UAV fotogrametrije na točnost modela te (c) radovi koji uspoređuju različite fotogrametrijske i druge vrste modela koristeći specifične metode (statističke, vizualne, itd.)

Definicije geodetskih pojmova su preuzete iz službenog dokumenta Državne geodetske uprave (DGU) *Specifikacija proizvoda snimanje iz zraka i orijentacijske točke verzija 2.1*, objavljenog 2017. godine te priručnika ASPRS, (2009). U pisanju teorijske osnove diplomskog rada najviše su korišteni **Micheletti i dr. (2015)**, **Smith i dr. (2016)**, **James i dr. (2017)**, **Anderson i dr. (2019)**, **Nesbit i Hugenholtz (2019)** koji objašnjavaju SfM tehniku, **Albertz i Wiedemann (1995)**, **Konecny (2003)**, **Schenk (2005)**, **Luhmann i dr. (2014)**, **Gosh (1981)**, **Linder (2009)**, **Li i dr. (2008)**, **Dlesk i dr. (2020)** koji analiziraju razvoje faze fotogrametrije, **Turner i dr. (2013)**, **O'Connor i dr. (2017)**, **Rabah i dr. (2018)** koji daju preporuke postavljanja parametara ekspozicije u zračnoj fotogrametriji te **Cramer i dr. (2000)**, **Skalouda i Legat (2008)**, **Pfeifera i dr. (2012)**, **Yuan i Zhang (2008)**, **Mian (2015)** koji pišu o teorijskoj točnosti IG-a.

(a) Procjena točnosti IG-a različitih sUAS;

Bláha i dr. (2011) analiziraju potencijal PPK procesiranja GPS podatka iz UAV-a s ciljem poboljšanja pozicijske točnosti za potrebe IG-a. Rezultati pokazuju da PPK bitno poboljšava pozicijsku točnost UAV-a. Navode da postoji daljnji prostor za poboljšanje u kontekstu moguće primjene IG-a.

Chiang i dr. (2012) razvijaju kamera-GPS modul koji omogućava sinkronizaciju ekspozicije kamere s položajem letjelice (mikro UAV). Uspoređuju tri fotogrametrijska softvera. Utvrđuju da je *Photoscan* najbolji te da je točnost modela ograničena točnošću diferencijalnog GPS-a (10-20 cm). Slično istraživanje provode **Mian i dr. (2015)** koji provjeravaju točnost IG-a na mikroUAV-u. Koriste *Applanix APX-15 UAV GNSS*-inercijalni sustav s kamerom Sony a7R i

objektivom *Nikkor 55 mm f/1.8*. Postižu horizontalnu točnost od 5 cm (RMS¹²) za DOF te 11 cm vertikalnu za stereo proizvode.

Rizaldy i Firdaus (2012) testiraju metodu IG-a koristeći kameru *Ultracam X* i *IGI AeroControl*, uređaj koji se sastoji od IMU-IIe temeljenog na optičkim žiroskopima (FOG¹³) i jedinicom za upravljanje sensorima (SMU¹⁴) s integriranim vrhunskim GNSS prijammnikom. Točnost procjenjuju na temelju 19 kontrolnih točaka. Vodoravna točnost iznosi 0,356 m, a vertikalna 0,483 m (ekvivalent 1: 2500).

Carbonneau i Dietrich (2016) ispituju točnost IG-a koristeći povoljne sUAS platforme. Navode da su povoljni sUAS sposobni proizvesti pouzdane topografske proizvode za akademske i komercijalne potrebe.

Rabah i dr. (2018) analiziraju primjenu GNSS sustava za osiguravanje dijela parametara (X, Y i Z) vanjske orijentacije (EO) koristeći dvije tehnike RTK¹⁵ and VRS¹⁶ te to uspoređuju s klasičnim fotogrametrijskim pristupom. Podatci su prikupljeni koristeći amatersku digitalnu kameru *Canon 18,2 MP*. Rezultati pokazuju da je tradicionalni fotogrametrijski proces točniji od IG-a. Međutim, horizontalna točnost za VRS je iznosila 0.029 m, za RTK 0.034 m, dok je vertikalna za VRS iznosila 0.026 m, a za RTK 0.029 m.

Stott i dr. (2020) analiziraju točnost izravnog georeferenciranja koristeći *DJI Phantom 4 RTK UAV*. Koriste 7 kontrolnih točaka (CP¹⁷) u sedam scenarija snimanja. Rezultati pokazuju da suprotno nekim istraživanjima OT nisu potrebne za točno topografskog modeliranje u kilometarskom mjerilu.

Zhang i dr. (2019) analiziraju pozicijsku točnost i ponovljivost fotogrametrijskih proizvoda generiranih pomoću UAV-PPK-SfM pristupa kroz izvođenje više letačkih operacija s dva različita sUAS-a: maleni jeftini mikro-UAV te profesionalni UAV opremljen digitalnom refleksnom (DSLR¹⁸) kamerom s jednim objektivom. Navode da PPK rješenje pruža istu točnost kao OT metoda za oba sUAS-a. Dokazuju da je UAV – PPK – SfM može pružiti dosljedne, ponovljive 4D podatke s točnošću od nekoliko centimetara.

¹² Root Mean Square

¹³ Fibre-Optic Gyros

¹⁴ Sensor Management Unit

¹⁵ Real-Time Kinematic

¹⁶ Virtual Reference System

¹⁷ Check Point

¹⁸ Digital Single-Lens Reflex Camera

(b) Utjecaj korisničko-definiranih parametara UAV fotogrametrije na točnost modela;

Oniga i dr. (2018) određuju optimalan broj OT-a u procesu UAV fotogrametrije na području od 1 ha. Koriste programe *Pix4D Mapper Pro* i *3DF Zephyr* te intervalno testiraju scenarije koristeći od 3 do 40 OT. Zaključuju da je za postizanje visoke točnosti fotogrametrijskih proizvoda, potrebna gustoća OT-a od 1OT/200 m². Slično istraživanje provodi **Tahar (2013)**.

Martínez-Carricondo i dr. (2018) analiziraju različitu distribuciju OT-a s ciljem dobivanja točnih fotogrametrijskih proizvoda. Najbolji rezultati su ostvareni sa stratificiranim planom postavljanja i postavljanjem OT-a na rubovima. Unutar područja istraživanja preporučuju gustoću od 0,5–1 OT × ha⁻¹ s ciljem minimaliziranja planimetrijske pogreške.

Agüera-Vega i dr. (2018) utvrđuju da povećanje broja OT-a poboljšava točnost modela. Na vertikalnu točnost (RMSEz) nije utjecala morfologija terena, nego visina leta i broja OT. Nadalje, vertikalna točnost se smanjivala kako se visina leta povećavala.

Nagendran i dr. (2018) analiziraju optimalan broj i distribuciju OT-a za postizanje točnih fotogrametrijskih rezultata prilikom korištenja jeftinih UAV-a na različitim visinama leta. Utvrđuju da OT moraju biti dobro raspoređene u prostoru istraživanja te da nužno veći broj OT-a ne doprinosi većoj točnosti modela. Navode da je 8-10 OT-a dovoljan broj za postizanje pouzdanog fotogrametrijskog proizvoda. Reljefno raščlanjeno područje zahtjeva korištenje većeg broja OT-a.

Anders i dr. (2020) analiziraju utjecaj vrste misije visine i smjera leta na točnost rezultata. Testiraju tri visine leta i dvije orijentacije putanje leta. Tehniku SfM smatraju pogodnom za izradu modela terena i rasprostranjenosti vegetacije. U praćenje geomorfoloških promjena ističu nužnost optimizacije i ponavljanje istih korisničko-definiranih parametara unutar svakog snimanja.

(c) Usporedba fotogrametrijskih i drugih modela koristeći specifične metode.

Esposito i dr. (2017) analiziraju promjene volumena u otvorenim rudnicima iz intervalnih oblaka točaka dobivenih UAV fotogrametrijom i tehnikom SfM. Udaljenost između dva oblaka procjenjuju s pluginom *Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)* koji je integriran u softver otvorenog koda *CloudCompare*. Slično istraživanje provode **Crawford i dr. (2018)** koji u analizi koriste i terestrički laserski skener (TLS-a) te **James i dr. (2017)** koji razvijaju i *Monte Carlo* pristup unutar SfM-a.

Widyaningrum i Gorte (2017) istražuju i analiziraju podatke dobivene fotogrametrijom (*Leica RCD30*) te LiDAR-om (*Leica ALS70*). Uspoređuje oblake točaka generirane tehnikama fuzije, SGM¹⁹ i SfM. Kvalitativne i kvantitativne procjene podataka oblaka točaka LiDAR-a, SGM i SfM-a podudaraju se u smislu vizualizacije, geometrijske točnosti i rezultata klasifikacije. Naglašavaju da su LiDAR podatci najbolji za modeliranje prostora velikih dimenzija.

Chen i dr. (2018) ispituju točnost i preciznost oblaka točaka zatvorenog prostora kroz integraciju tehnika kao što je proširena Gaussova slika (*EGI*)²⁰, iterativni algoritam najbliže točke (*ICP*)²¹ i histogram. Predstavljaju načine upotrebe navedenih tehnika koristeći *Scanse Sweep 3D*, ultra jeftini panoramski laserski skener. Ističu da uz optimizaciju pojedinih parametara, LiDAR skener pruža zadovoljavajuće rezultate.

Eker i dr. (2018) analiziraju klizišta na temelju fotogrametrijskih podataka UAV-a i LiDAR-a. Podatci prikupljeni UAV-om (*ARF MikroKopter OktoXL*) opremljenog kamerom *Canon EOS 650D DSLR* 18 MP. SfM tehnikom su generirali DEM-ove, primjenjujući tehnike DoD (razlike dva DEM-a) i M3C2. Utvrđuju da razlika DoD-a (UAV-a i LiDAR-a) iznosi između 2 i 6,6 m, a razlika dvaju oblaka izvedenih pomoću M3C2 iznosi između 2 i 2,5 m. Ističu algoritam M3C2 kao prikladnim za postizanje preciznih rezultata.

¹⁹ Semi Global Matching

²⁰ Extended Gaussian image

²¹ Iterative closest point

3. TEORIJSKA OSNOVA

3.1. Razvojne faze fotogrametrije

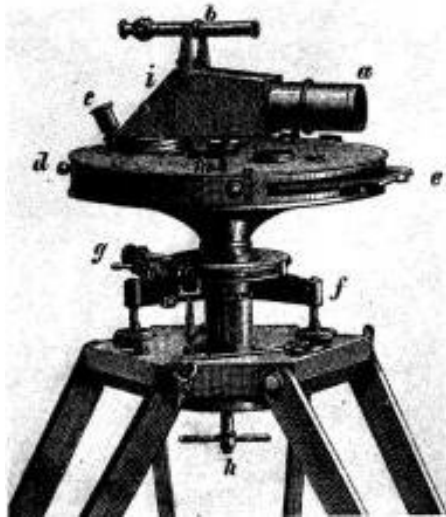
Ideja o dobivanju geometrijskih značajki iz fotografije povezana je s proučavanjem perspektive i centralne projekcije, koje potječu od talijanske renesanse. Za potrebe takvih mjerenja bilo je potrebno izumiti fotografiju (Konecny, 2003). Dakle, povijest fotogrametrije duga je gotovo kao i sama fotografija. Izumi fotografije Joseph Nicéphore Niépcea i Louis-Jacques-Mandé Daguerrea sredinom 19. stoljeća potaknuli su mnoge eksperimente (Luhmann i dr. 2014) te inovativnu primjenu fotografije (Li i dr. 2008). Glavne faze fotogrametrije su izravno povezane s tehnološkim izumima fotografije, zrakoplova, računala i elektronike (Schenk, 2005). Stoga se razvoj fotogrametrije prema metodi izvođenja geometrijskih značajki može podijeliti u nekoliko faza. U prvoj, grafičkoj fazi (1850. - 1900.), fotogrametrijska restitucija je postizana grafičkim konstrukcijama na stolu za crtanje. Izum stereoplotera predstavlja temelj analogne faze (1900. - 1960.), na koju se potom nastavlja analitička (matematička) faza (1960. – 1990.) koja primjenjuje automatizirane stereplotere. Posljednja faza odnosi se na digitalnu fotogrametriju (1990. – danas) temeljenu na digitalnoj fotografiji, u kojoj se koriste suvremeni instrumenti te napredne metode obrade digitalnih fotografija (Albertz i Wiedemann, 1995).

3.1.1. Grafička fotogrametrija

Grafičku fazu (1850.-1900.) obilježava fotogrametrijska restitucija na grafičkom stolu sljedeći principe deskriptivne geometrije (Albertz i Wiedemann, 1995). Prva faza bila je eksperimentalna s izvanrednim postignućima u terestričkoj i balonskoj fotogrametriji (Schenk, 2005), usmjerena prema arhitektonskom, a ne topografskom modeliranju (Luhmann i dr., 2014). Fotografski ili grafički stol (Slika 3) razvio je Chevallier 1858. godine, a konstruiran je tako da je kamera izložena s foto pločicama u vodoravnom položaju. Na stolu se svjetlosne zrake odbijaju pod pravim kutom pomoću prizme, koja je bila pričvršćena na rotirajući nišanski uređaj (URL 2).

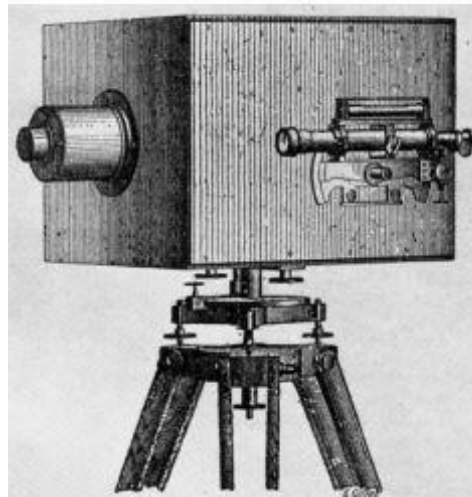
Fotogrametrija je u počecima bila ograničena na terestrička snimanja. Prvi pokušaji snimanja iz zraka bili su već 1860-ih kada se kamere montiraju na zmajeve i balone (Li i dr., 2008). Smatra se da je otac fotogrametrije *Aimé Laussedat*, prva osoba koja je koristila terestričke fotografije za topografsko modeliranje (plan grada Pariza, 1867.). Također, smatra se prvom osobom koja je snimila zračnu fotografiju iz balona (URL 2). Pojam *fotogrametrija* prvi je upotrijebio *Albrecht Meydenbauer* 1867. godine u svom djelu *Die Photometrographie* (Albertz, 2007). Grafičku fazu obilježava razvoj prvih fotogrametrijskih kamera (Slika 4). A.

Meydenbauer 1867. godine konstruirao prvu kameru sa širokokutnim lećama korištenu u topografskom snimanju (URL 2). Primjenom vlastitih kamera velikih formata, Meydenbauer izrađuje arhivu metričkih fotografija, predstavljajući time rane primjere očuvanja kulturne baštine korištenjem fotogrametrije (Luhmann i dr., 2014).



Slika 3. Chevallierov fotografski stol

Izvor: URL 2



Slika 4. Jedna od prvih fotogrametrijskih kamera

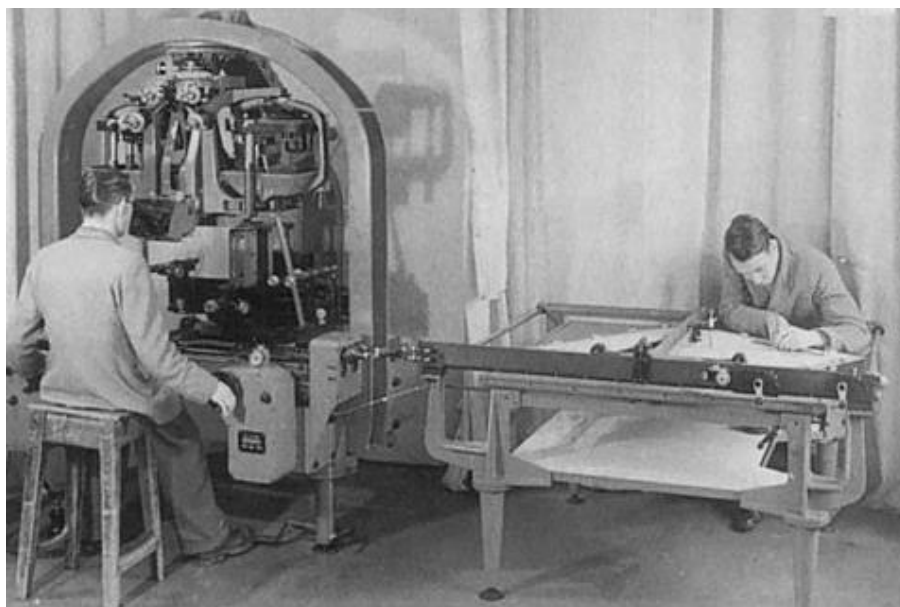
Izvor: Luhmann i dr., 2014

Terestričke i balonske fotografije u prvoj razvojnoj fazi fotogrametrije nisu bile prikladne za kvalitetno modeliranje Zemljine površine (Konecny, 2003). Pojedini pokušaji rekonstrukcije geometrijskih podataka iz balonskih fotografija (temeljeni na matematičkim metodama, bez upotrebe računala) iskazali su se vrlo neprikladnim za sustavnu upotrebu, zbog izrazito dugog vremena obrade (Konecny, 2003). Dakle, prva faza prepoznatljiva je po terestričkim fotografijama velikih formata i povećane preciznosti (Albertz i Wiedemann, 1995).

3.1.2. Analogni fotogrametrija

Geometrijska rekonstrukcija fotografija kod analogne faze (1900.-1960.) postiže se optičko-mehaničkim uređajima. Uređajima se pozicioniraju fotografije tako da se stvara percepcija dubine. Ručnim pomicanjem i kontroliranjem kretnji plutajućeg znaka (engl. *floating mark*) pod stereoskopskim vidom omogućeno je kartiranje strukturnih i konturnih linija objekata (Albertz i Wiedemann, 1995, Li i dr. 2008). Povećanje točnosti geometrijskih odnosa između objekata (scene) i fotografija ostvareno je razvojem optičko-mehaničkih uređaja (Konecny, 2003). Analogno računanje bilo je najkorištenije i najuspješnije tijekom velikog dijela 20. stoljeća.

Sljedeći, ključan utjecaj na razvoj fotogrametrije početkom 20. stoljeća imao je razvoj zrakoplovstva te konstrukcija zračnih kamera. Time veliki dijelovi Zemljine površine postaju dostupni za sustavna proučavanja (Luhmann i dr., 2014). Izumom stereoplota (Slika 5) razvija se stereofotogrametrija koja predstavlja temelj analogne faze fotogrametrije (Konecny, 2003). Prva zračna kamera razvijena je 1915. godine s uskim kutom snimanja (Konecny, 2003, Li i dr., 2008). Medij za pohranu fotografija kod analognih kamera bili su stakleni negativ i fotografске vrpce. Veliki i skupi instrumenti te složnost procesa fotogrametrije zahtijevali su specifična iskustva i znanja, što je rezultiralo pojavom zanimanja fotogrametrijskih operatera (Linder, 2009, Dlesk, 2020).



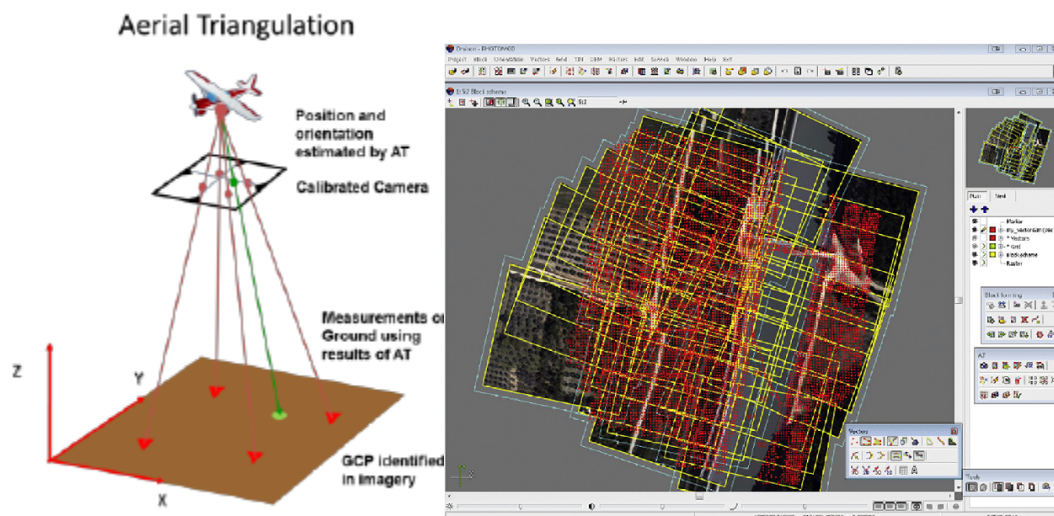
Slika 5. Stereoploter

Izvor: Burnside, 1995

Unaprijeđenje kamera u kontekstu poboljšanja kvalitete fotografija događa se od 1930. do 1980. godine. Razvijaju se kamere sa sustavima leća (devet i više leća) osiguravajući time koso snimanje (Li i dr., 2008). Brza optičko-mehanička rekonstrukcija fotografija omogućena je razvojem analognih instrumenata sa stereo mjerenjima (Konecny, 2003). Dizajn i učinkovitost zračnih kamera znatno je poboljšana tijekom 1970-ih, tad su automatizacija i razvoj mikroelektronike doprinijele povećanom dostupnošću fotogrametrije.

Pojednostavljenje procesa fotogrametrije postignuto je razvojem aerotriangulacije (Slika 6). Aerotriangulacija je proces određivanja koordinata (X, Y i Z) pojedinih točaka na temelju niza preklapajućih zračnih fotografija. Točke objekta čije su vrijednosti koordinata poznate – orijentacijske točke (OT) (engl. GCP) moguće je povezati s ostalim točkama na

fotografiji u istom sustavu (Barrie, 1961). Glavna svrha AT je progušćivanje geodetske mreže veznim točkama, koje su potrebne za generiranje modela (URL 3).



Slika 6. Primjeri zračne triangulacije (AT)

Izvori: Rabah i dr. 2018, Tsanaka i dr., 2017

Dolazi do afirmacije fotogrametrije kao najpouzdanije metode snimanja i kartiranja (Albertz i Wiedemann, 1995, Konecny, 2003, Linder, 2009). Kod analogne fotogrametrije kamere su imale visoku optičku kvalitetu, čime je naglasak stavljen na točnost fotogrametrijskog mjerenja. Fotogrametrijsko snimanje u analognoj fazi bilo je sofisticiranije u odnosu na raniju fazu, jer se počinju primjenjivati visokokvalitetne metričke kamere, gdje je snimanje precizno planirano. Izuzetno skupi medij za pohranu te dugotrajan proces obrade većeg broja fotografija bili su osnovni nedostaci u ovoj razvojnoj fazi fotogrametrije (Dlesk, 2020).

3.1.3. Analitička fotogrametrija

Djelomična automatizacija fotogrametrijskog procesa ostvarena je u fazi analitičke fotogrametrije (1960.-1990.) koja započinje razvojem elektroničkih računala i analitičkih stereoplotera. Odnosi između točaka (elemenata) fotografije i objekta (scene) u ovoj fazi su opisani numeričkim vrijednostima na osnovi jednadžbi kolinearnosti (Albertz i Wiedemann, 1995, Konecny, 2003). Dakle, analitička faza temelji se na matematičkim metodama, dok su se kod prethodne (analogne) faze, informacije o objektima dobivale na temelju sličnosti koje su razvijene optičko-mehaničkim postupcima (Gosh, 1981). Prelazak s analognog na analitički pristup pružio je gotovo neograničenu točnost i pouzdanost izračuna, čija je fleksibilnost ograničena samo matematičkim modelom na kome se temelji (Luhmann i dr., 2014, Konecny,

2003). Analitička faza fotogrametrije primarno je bila usmjerena na korištenje metode aerotriangulacije (AT). Značajan napredak u izvođenju AT zahtijevao je instrumente za mjerenje koordinata fotografija. Stoga su dizajnirani stereokomparator²² i mono-komparator za zračne fotografije. Razvijeni su i programi za prilagođavanje svjetlosnih snopova (engl. *Bundle Block Adjustment* - BBA) kod zračnih snimki (Luhmann i dr., 2014). Prilagođavanje svjetlosnih snopova (BBA) je matematička tehnika koja povezuje pojedinačne snopove snimki u cjelinu i utvrđuje prostorni položaj svakog snopa snimke, u odnosu na koordinatni sustav na temelju poznatih točaka. Snopovi svih snimki prilagođavaju se zajedno, dok se svjetlosne zrake sijeku, njihovo sjecište predstavlja položaj vezne ili osnovne točke bloka u prostoru (Ciceli, 2007). Analitičku fazu fotogrametrije moguće je podijeliti u nekoliko podfaza prema korištenim instrumentima. Razvojem analitičkog stereoplota (Slika 6) 1960-ih, značajno je promijenjen tijek fotogrametrije. Instrumenti su postali značajno jeftiniji, manji te jednostavniji za korištenje (Linder, 2009). Računala ugrađena u stereoplote rezultirala su analitičkim stereoploterima s matematičkom rekonstrukcijom modela. Kalibracija kamere do 1960-ih bila je gotovo zanemarena. Primjena standardnih metoda kalibracije rezultirala je mnogim pogreškama, koje su riješene upotrebom neizravnih analitičkih metoda i drugih prilagodbi (Luhmann i dr., 2014).



Slika 7. Analitički stereoploter

Izvor: Lanckton, 1969

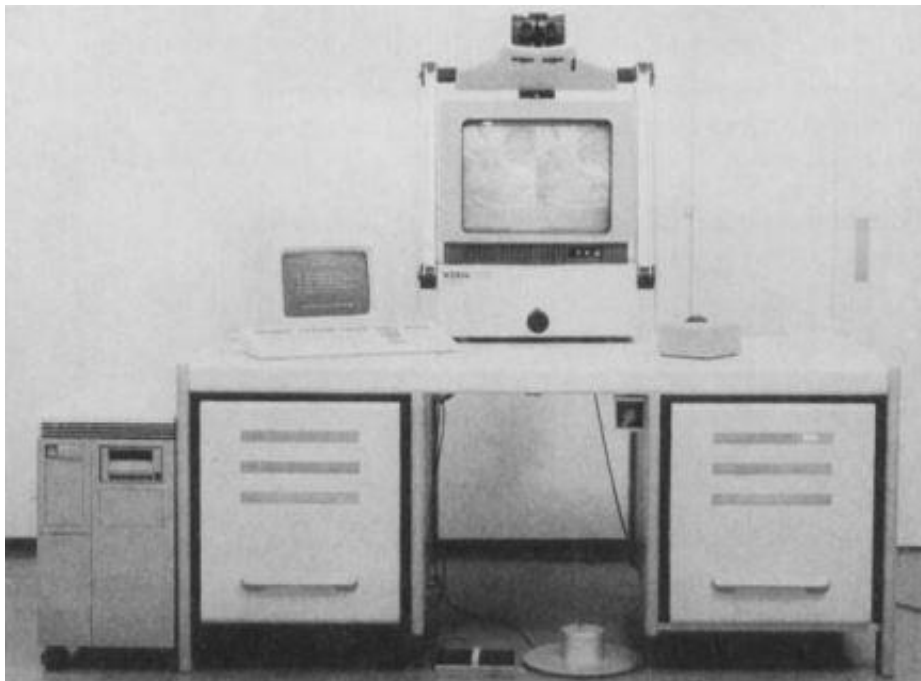
Metričke kamere s poznatim vrijednostima unutarnje orijentacije bile su iznimno skupe, nepraktične i glomazne. Značajno povećanje upotrebe optičko-elektroničkih senzora

²² Optički instrument, dvostruki mikroskop, služi za određivanje koordinata terenskih točaka u fotogrametriji.

zabilježeno je sredinom 1980-ih. Danas je moguće koristiti bilo koju vrstu kamere za proces fotogrametrije (Luhmann i dr., 2014). Prijelaz s analognog na analitički pristup u ovoj fazi još uvijek je zahtijevao rad na analognim fotografijama s visoko preciznim optičko-mehaničkim instrumentima (Linder, 2009).

3.1.4. Digitalna fotogrametrija

Digitalna faza fotogrametrije (1990. - danas) temeljena na obradi digitalnih fotografija omogućena je 1990-ih primjenom automatskih fotogrametrijskih sustava. Aerotriangulacija se u ranijim razvojnim fazama fotogrametrije izvodila pomoću analognih instrumenata. Dostupnošću računala 1950-ih te povećanjem njihove snage 1960-ih taj je proces usmjeren na matematičke izračune, gotovo za neograničen broj fotografija. Značajnim tehnološkim napretkom ubrzan je razvoj računalne tehnologije koju od 1980-ih do danas obilježavaju veoma brza računala s gotovo neograničenim kapacitetima za pohranu, uz smanjene troškove (Li i dr., 2008). Interaktivni digitalni stereofotogrametrijski sustavi (Slika 8) prisutni su od 1988. godine, a zamjenjuju analitičke plotere. Važni su zbog obrade više fotografija te opcija slobodnog odabira konfiguracije fotografije unutar sustava (Luhmann i dr., 2014). Prvi korak u razvojnoj fazi digitalne fotogrametrije je bilo utvrđivanje koordinata analognih fotografija. Upotreba digitaliziranih fotografija predstavila je golemi potencijal za potpunu automatizaciju procesa fotogrametrije (Albertz i Wiedemann, 1995).



Slika 8. Digitalni stereofotogrametrijski sustavi

Izvor: Bethel, 1990.

Dakle, proces digitalne fotogrametrije se u počecima sastojao od analognog dijela koji je podrazumijevao korištenje analognih fotografija. Tad je ključno bilo koristiti visokoprecizne skenere. Fotografije na filmskoj vrpici s naknadnim skeniranjem postale su standard početkom 1990-ih, zbog izrazito visokih cijena digitalnih kamera (Linder, 2009). Međutim, pojavom digitalnih kamera 1990-ih fotogrametrija doživljava potpunu revoluciju (Dlesk, 2020). Prve digitalne kamere visoke rezolucije rezultirale su fotografijama čija je razlučivost bila od 1000 x 1000 piksela do 4000 x 4000 piksela. Prijenosne visokorezolucijske kamere postale su manje i jednostavnije za rukovanje što je rezultiralo njihovom širom primjenom (Luhmann i dr., 2014). Automatizacija i digitalizacija cijelog procesa profilirala je sasvim novu disciplinu fotogrametrije čiji je temelj digitalna fotografija (Konecky, 2003, Schenk, 2005, Linder, 2009). Ovakav sustav donosi velike prednosti kao što je ubrzanje procesa rada, gdje više nije potrebno razvijati filmove, što u konačnici rezultira smanjenim troškovima. Primjena digitalnih fotografija usmjerila je izvođenje cijelog fotogrametrijskog procesa izravno na računalu. Digitalne kamere su unaprijeđene toliko da se snimljene fotografije automatski pohranjuju na memorijskim karticama što omogućava brzo prenošenje fotografija na računala (Grotta, 2001).

Goleme promjene u fotogrametriji rezultat su novog tehnološkog napretka koji je omogućio ubrzan razvoj te implementaciju bespilotnih letjelica (UAV) unutar fotogrametrije. Primjena praktičnih UAV-a omogućili su brzo i jednostavno prikupljanje podataka uz smanjene troškove u usporedbi s klasičnim zrakoplovima s posadom (Agüera-Vega i dr., 2018). Revolucionarni razvoj i komercijalizacija tehnologije te razvijena mikroelektronika osigurala je široku dostupnost manjih bespilotnih letjelica (UAV) koje su snažno preuzele tržište elektronike (Shakhatreh i dr., 2019). Bespilotne zračne letjelice (UAV) su donedavno smatrane vrlo nepristupačnom tehnologijom, namijenjenu isključivo vojnoj i profesionalnoj primjeni (Nebiker i dr., 2008). Međutim, proizvodnja novih platformi (sUAS) za snimanje koje nude visoku rezoluciju, točnost i fleksibilnost usmjerilo je fotogrametrijski proces na potpuno novu razinu (Li i dr., 2008, Remondino i dr., 2011).

Posljednjih godina prisutna je značajna primjena bespilotnih letjelica (UAV) i fotogrametrije u mnogim znanstvenim područjima i poljima (Koldaev, 2007, Danilov i dr., 2015, Ruzgienė i dr., 2015, Torresan i dr., 2017, Chudley i dr., 2019). Bespilotne letjelice su leteće platforme opremljene brojnim sensorima, koje mogu biti navođene od strane korisnika te samostalno (Hackney i Clayton, 2015). Primjena UAV-a i digitalne fotogrametrije važna je zbog mogućnosti generiranja korisnih podataka i informacija o Zemljinoj površini u vrlo kratkom vremenu (Nagendran i dr. 2018).

Dakle, faza digitalne fotogrametrije obogaćena je razvojem i primjenom najnovijih tehnika i alata obrade digitalnih fotografija, prilikom čega je omogućeno automatsko mjerenje točaka, transformacija koordinata, izvođenje 3D modela i sl. (Konecky, 2003, Schenk, 2005, Linder, 2009). Algoritmi računalnog vida od 2010. godine su izrazito popularne tehnike za potpuno automatizirano modeliranje temeljeno na proizvoljno snimljenim i odabranim fotografijama (Luhmann i dr., 2014). Danas je proces fotogrametrije dodatno ubrzan zbog primjene nemetričkih digitalnih kamera te inovativnih tehnika, što je uvelike doprinijelo smanjenju troškova, bržom i jednostavnijom obradom (Dlesk, 2020).

3.1.4.1. Izravno georeferenciranje (engl. *direct georeferencing*)

Konvencionalan pristup u digitalnoj fotogrametriji temeljen je na primjeni orijentacijskih točaka (OT) i aerotriangulacije (AT) u procesu izvođenja geometrijskih podataka iz fotografija (Aziz i dr., 2014, Mian i dr., 2015, Esposito i dr., 2017, Oniga i dr., 2018, Martínez-Carricondo i dr., 2018., Sanz-Ablanedo i dr., 2018). OT su točke smještene na vidljivim i nezaklonjenim mjestima na tlu, koje se mogu identificirati na više fotografija. OT imaju poznate koordinate (X, Y i Z), izmjerene pomoću točnih i preciznih GNSS prijamnika. Orijetacijske točke osnova su za mjerenja i kompilaciju u aerotriangulaciji (DGU, 2017, 15). Aerotriangulacija je proces uspostavljanja točnih odnosa između elemenata fotografije i referentnog koordinatnog sustava tla, time se proglašuju stalne geodetske i kontrolne točke – orijentacijske točke (OT) (engl. GCP) s veznim točkama iz susjednih stereoparova i nizova. Zadatak AT je proizvesti dovoljan broj veznih točaka temeljem OT-a, radi ostvarenja točne orijentacije za izvođenje trodimenzionalnih modela iz fotografija (NN, 15/2020). Međutim, prikupljanje orijentacijskih točaka ima očite nedostatke i ograničenja: vremenski je veoma zahtjevan postupak koji podrazumijeva korištenje vrlo skupe opreme (GNSS prijamnici) (Smith i dr., 2016.). Izvođenje geometrijskih značajki određenog objekta bez potrebe za AT-om i prikupljanjem OT-a, danas se rješava primjenom izravnog georeferenciranja (IG). Naime, razvoj mikro elektro-mehaničkih sustava (MEMS²³-a) omogućio je veću dostupnost jeftinih senzora male veličine i težine te razvoj autopilota za UAV. Temelj UAV-a je navigacijski sustav unutar kojeg integrirani sustav senzora procjenjuje kinematičko stanje letjelice, odnosno položaj, brzinu i orijentaciju (Barton, 2012).

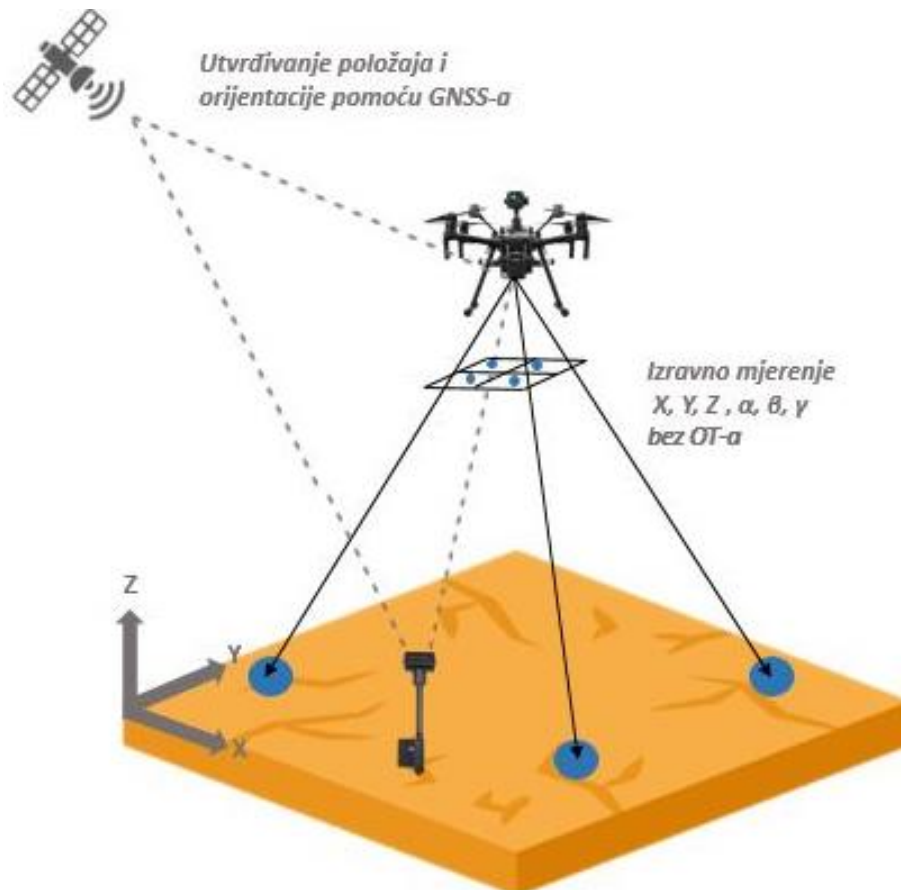
Izravno georeferenciranje (IG) najnoviji je pristup u fotogrametriji koji se temelji na izravnom mjerenju šest parametara vanjske orijentacije (engl. *exterior orientation* – EO) u

²³ Micro-ElectroMechanical System

kojem GNSS prijamnik određuje položaj (X, Y i Z) kamere te inercijalna mjerna jedinica (engl. *Inertial Measurement Unit* – IMU) koja mjeri orijentaciju/ nagib kamere (yaw, pitch i roll) u vremenu prikupljanja fotografije (Turner i dr., 2013, ASPRS, 2009, Rizaldy i Firadus, 2012, Carbonneau i Dietrich, 2016). Sustav IG-a temelji se na inercijalnom navigacijskom sustavu (engl. *Inertial navigation system* – INS) koji se sastoji od senzora inercijalne mjerne jedinice (IMU) te GNSS prijarnika, koji su integrirani na UAV (Mian i dr., 2015). INS je navigacijski uređaj sastavljen od skupine senzora – akceleratora, barometra, kompasa, magnetometra, žiroskopa, GNSS-a te uređaja za pohranu i mikroprocesora, koji omogućuje obradu podataka sa svih senzora (URL 4). Temeljni elementi IMU sustava senzora jesu akceleratori i žiroskopi (Kranjec i Pavasović, 2006). Unutar IMU sustava žiroskopi pružaju informacije o rotacijskim parametrima, dok akceleratori o linearnom ubrzanju UAV-a (Barton, 2012). Dakle, INS pruža cjelovite informacije o položaju i orijentaciji, jer u sustavu uključuje više radnih komponenti, dok IMU osigurava podatke samo za brzinu i rotaciju (URL 4). Integracija INS-a i GNSS prijarnika osigurava neprekidne informacije o položaju s velikom točnošću i pouzdanosti (Kranjec i Pavasović, 2006). Nove generacije diferencijalnih GNSS prijarnika mogu istovremeno pratiti 336 kanala, što omogućava korištenje bilo kojeg satelita u svrhu točnog pozicioniranja. Podaci prikupljeni od GNSS-a i IMU-a obrađuju se u stvarnom vremenu, skupno s podacima iz referentne stanice, time se dobivaju točne informacije o položaju i orijentaciji senzora u vremenu prikupljanja (Mian i dr., 2015). Točnost tehnike izravnog georeferenciranja najviše ovisi o točnosti ugrađenih senzora (GNSS prijarnika i IMU sustava) koji se koriste prilikom snimanja. Dakle, metoda IG-a uklanja potrebu za prikupljanjem orijentacijskih točaka (OT) i aerotriangulacijom (AT), oslanjajući se na potpuno automatski proces georeferenciranja (Oniga i dr., 2018). IG/UAV pristup podrazumijeva izravno mjerenje položaja i orijentacije senzora u zraku, tako da svaki piksel na fotografiji može biti georeferenciran prema koordinatnom sustavu (Mian i dr., 2015).

Glavni izvori pogrešaka predstavljaju i greške unutarnje orijentacije (engl. *Interior orientation* – IO). Parametri unutarnje orijentacije (IO) – kalibrirana žarišna udaljenost (engl. *focal length*), optički centar (engl. *principal point*) i zakošenost piksela (engl. *skew*) utvrđuju se kalibracijom kamere (Carbonneau i Dietrich, 2016). Parametri IO određeni su pod stalnim i homogenim temperaturnim uvjetima, čime su nemjerne kamere koje nisu kalibrirane, podložnije vanjskim utjecajima (temperatura, tlak zraka i sl.). Elementi vanjske orijentacije svih fotografija u IG-u dobiveni od IMU senzora i GNSS prijarnika, ispravljani su pomoću Kalman filtera. Pogreške elemenata IO i EO koordinata točaka fotografija znatno utječu na točnost IG (Yuan i Zhang, 2008). Mean, standardna devijacija i RMSE predstavljaju statističke

metode koje se najčešće koriste za procjenu točnosti kod izravnog georeferenciranja. Današnje bespilotne letjelice (UAV) većinom su opremljene jeftinim GNSS prijammnicima koje rezultiraju smanjenom točnošću. Međutim, postoje RTK-GNSS uređaji koji poboljšavaju točnost te su znatno prikladniji za izravno georeferenciranje (Gabrlík, 2015).



Slika 9. Princip izravnog georeferenciranja

3.2. Matrice 210 RTK V2

UAV Matrice 210 RTK V2 (Slika 10) je proizvod kineske tehnološke tvrtke DJI koja opskrbljuje 70% svjetskog tržišta UAV-a (Przybilla i dr., 2020). Bepilotna letjelica opremljena je RTK modulom visokih performansi. Sustav *OcuSync 2.0* podržava automatsko prebacivanje frekvencijskog opsega čime je dolet leta proširen na 8 km. Nadalje, sustav *TimeSync* poravnava kontroler leta, kameru, GPS, RTK i ostalu opremu na letjelici. Poboljšanje sigurnosti i performansi leta uz opterećenje na letjelici, omogućeno je novom *DJI Pilot* aplikacijom. Senzori sustava *FlightAutonomy* otkrivaju i izbjegavaju prepreke, dok mogućnost *Anti-Collision Beacon* osigurava vidljivost u uvjetima slabijeg osvjetljenja ili noću. Integrirani ADS-B prijamnik *DJI AirSense* tehnologije usmjeren je na sigurnost u zračnom prostoru koja automatski pruža informacije u stvarnom vremenu o zrakoplovima i helikopterima u blizini letjelice (DJI, 2021). Detaljne karakteristike bespilotne letjelice predstavljene su u Tablici 1.

Tablica 1. Karakteristike bespilotne letjelice Matrice 210 RTK V2

Model	M210 RTK V2
Dimenzije (rasklopljeno)	883 × 886 × 427 mm
Dimenzije (sklopljeno)	722 × 282 × 242 mm
Dijagonalni međuosovinski razmak	643 mm
Broj baterija	2
Težina (s dvije TB55 baterije)	oko 4,91 kg (s dvije baterije TB55)
Maksimalna težina	6,14 kg
Maksimalni nosivost (s dvije TB55 baterije)	1,23 kg
Točnost leta (P-način s GPS-om)	Vertikalno: ± 0,5 m, horizontalno: ± 1,5 m
Točnost leta (D-RTK 2, Matrice M210 RTK V2)	Vertikalno: ± 0,3 m (± 0,1 m), horizontalno: ± 0,3 m (± 0,1 m)
Maksimalna kutna brzina	Pitch: 300°/s ; Yaw:120°/s
Maksimalni kut nagiba/ Pitch (pojedinačni gimbal prema dolje)	S-način rada: 30°; P-način: 30°; A-način rada: 30°
Maksimalni kut nagiba/ Pitch (gimbal prema gore)	S-način rada: 30°; P-način: 30° ; A-način rada: 30 °
Maksimalni kut nagiba/ Pitch (dvostruki gimbal prema dolje)	S-način rada: 30°; P-način: 30° ; A-način rada: 30 °
Maksimalna brzina uzlijetanja	5 m / s
Maksimalna brzina slijetanja	3 m / s
Maksimalna brzina (pojedinačni gimbal prema dolje)	S-način / A-način: 81 km / h ; P-način rada: 61,2 km / h
Maksimalna brzina (pojedinačni gimbal prema gore)	S-način / A-način: 73,8 km / h; P-način rada: 61,2 km / h
Maksimalna brzina (dvostruki gimbal prema dolje)	S-način / A-način: 73,8 km / h ; P-način rada: 61,2 km / h
Maksimalna visina rada letjelice	3000 m (s propelerom 1760S)
Maksimalni otpor prema vjetru	12 m / s
Maksimalno vrijeme leta (bez tereta, s TB55)	33 min
Maksimalno vrijeme leta (puna nosivost, s TB55)	24 min
Model motora	DJI 3515

Model propelera	1760S
GNSS	GPS + GLONASS + BeiDou + Galileo
Radna temperatura	-20 ° do 50 ° C
IP Rating	IP43
Baterija	
Model	TB55 (standardni)
Kapacitet	7660 mAh
Napon	22,8V
Tip baterije	LiPo 6S
Energija	174,6Wh
Težina	885g
Radna temperatura	-20 ° do 45 ° C
Temperatura skladištenja	Manje od 3 mjeseca: -20 ° C do 45 ° C Više od 3 mjeseca: 22 ° C do 28 ° C
Temperatura punjenja	Od 5 ° do 40 ° C
Maksimalna snaga punjenja	180 W
Daljinski upravljač	
Tip	GL900A
Radna frekvencija	2,4000-2,4835 GHz; 5,725-5,850 GHz
Maksimalna udaljenost odašiljanja (bez smetnji)	NCC / FCC: 8 km; CE / MIC: 5 km; SRRC: 5 km
EIRP	2,4 GHz: ≤ 26 dBm (NCC / FCC); ≤ 20 dBm (CE / MIC); ≤ 20 dBm (SRRC) 5,8 GHz: ≤ 26 dBm (NCC / FCC); ≤ 14 dBm (CE); ≤ 26 dBm (SRRC)
Napajanje	Proširena inteligentna baterija (model: WB37-4920mAh-7,6V)
Napon (max.)	13 W (bez napajanja monitora)
USB napajanje	1 A=5,2 V (maks.)
CrystalSky	DJI CrystalSky 7,85 inča, Rezolucija: 2048 × 1536; Svjetlina: 2000 cd / m2; Operativni sustav: Android 5.1; Pohrana: ROM 128 GB
Radna temperatura	-20 ° do 50 ° C

Izvor: DJI, (2021)



Slika 10. Беспилотна летјелца Matrice 210 RTK V2

Izvor: URL 8

3.2.1. Kamera Zenmuse X7

Tablica 2. Karakteristike kamere Zenmuse X7

Ime	Zenmuse X7
Dimenzije	151 × 108 × 132 mm
Težina (bez objektiva)	449 g
Senzor	Veličina senzora: 23,5 × 15,7 mm Veličina senzora (maksimalno područje snimanja video zapisa): 23,5 × 12,5 mm Razlučivost u pikselima: 24 MP
Podržane leće	DJI DL-S 16 mm F2,8 ND ASPH DJI DL 24 mm F2,8 LS ASPH DJI DL 35 mm F2,8 LS ASPH DJI DL 50 mm F2,8 LS ASPH
Podržane Micro SD / SSD kartice	MicroSD: klasa 10 ili UHS-1 s brzinom pohranjivanja od 15 MB/s; Maksimalni kapacitet: 128 GB SSD: DJI CINESSD
Veličine fotografija	3: 2 (6016 × 4008) 16: 9 (6016 × 3376) 4: 3 (5216 × 3912)
Formati fotografija	DJI CINESSD: DNG Micro SD: DNG, JPEG, DNG + JPEG
Načini fotografiranja	Micro SD: pojedinačna snimka, serijsko snimanje (3/5/7/10 snimki), automatsko podešavanje ekspozicije (3/5 s; 0,7 EV), intervalni SSD: RAW bljeskalice (3/5/7/10/10/14 ∞ okvira), do 20 fps pri uporabi RAW bljeskalice (točna količina određuje se kapacitetom memorijske kartice i razinom baterije)
Brzina zatvarača	Brzina elektroničkog zatvarača: 1/8000 - 8s Mehanička brzina zatvarača: 1/1000 - 8s (DJI DL-S 16 mm F2,8 ND ASPH nije podržan)
ISO raspon	Fotografija: 100 - 25600 Video: 100 - 1600 (uključen način EI); 100 - 6400 (način rada EI isključen)
Način ekspozicije	Automatski, ručno, prioritet zatvarača, prioritet blende
Kompenzacija ekspozicije	± 3,0 (3 zaustavljanja svjetlosti)
Raspon radne temperature	-20 do 40 ° C
Raspon temperatura skladištenja	-20 do 60 ° C

Izvor: URL 19

Tablica 3. Karakteristike objektiva kamere Zenmuse X7

Žarišna duljina	16 mm
35 mm ekvivalent	24 mm
Raspon otvora blende	F2.8 - F16
Težina	178 g
Promjer filtra	46 mm

Izvor: URL 20



Slika 11. Kamera Zenmuse X7 i objektiv DS-L 16 mm

Izvor: URL 9

3.2.2. *D-RTK 2 Mobilna Stanica*

D-RTK 2 je GNSS mobilna stanica (Slika 12) visoke preciznosti koja podržava četiri globalna satelitska navigacijska sustava: *GPS*, *BEIDOU*, *GLONASS* i *Galileo*. *D-RTK 2* se može koristiti kao *RTK* mobilna bazna stanica za postizanje točnosti pozicioniranja na razini centimetra, u slučaju *NTRIP*²⁴ implementacije, za one UAV sustave koji su opremljeni sa sustavom pozicioniranja *DJI RTK* (*Agras T20*, *T16*, *MG-1PRTK*, *Phantom 4 RTK*, *P4 Multispectral*, *Matrice 300 RTK*, *Matrice 210 RTK V2*).

Prema službenim specifikacijama funkcije *D-RTK 2* su pouzdane čak i u okruženjima s jakim magnetskim smetnjama (visokonaponski vodovi) i u blizini metalnih struktura. Može se koristiti kao uređaj za kartiranje s ciljem postizanja poboljšane preciznosti u položaju točaka ili u drugim inženjerskim primjenama. Nadalje, može se koristiti kao stacionarno *RTK* bazno rješenje za brzu izgradnju mrežnih *RTK* usluga. *D-RTK 2* ima pet operativnih načina rada koji se mogu koristiti za različite proizvode i potrebe (Tablica 4). *D-RTK 2* je opremljena *IMU*-om

²⁴ Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

visokih performansi za praćenje statusa uređaja i slanje podataka *UAV*-u. U Tablici 5. navedene su detaljne specifikacije *D-RTK 2* mobilne stanice.

Tablica 4. Dostupni operativni načini rada *D-RTK 2*

Moduli	Naziv i kompatibilni proizvodi	Uzorak svjetla
Operativni modul 1	Mobile Base Station (<i>T20/T16/MG-1P RTK/ Phantom 4 RTK/P4 Multispectral</i>)	1
Operativni modul 2	Stacionary Base Station	2
Operativni modul 3	Handhled Mapping Device (<i>T20/T16/MG-1P RTK/ Phantom 4 RTK</i>)	3
Operativni modul 4	Mobile Base Station (<i>Matrice 210 RTK V2</i>)	4
Operativni modul 5	Mobile Base Station (<i>Broadcast Mode, M300 RTK</i>)	5

Izvor: (DJI, 2020)

Tablica 5. Karakteristike *D-RTK 2* mobilne stanice

GNSS prijammnik	
GNSS frekvencija (engl. <i>GNSS Frequency</i>)	GPS: L1 C/A, L2, L5 BEIDOU: B1, B2, B3 GLONASS: F1, F2 Galileo: E1, E5A, E5B
Točnost pozicioniranja (engl. <i>Positioning Accuracy</i>)	<u>Single Point</u> Horizontalna: 1.5 m (RMS) Vertikalna: 3.0 m (RMS) <u>RTK</u> Horizontalno: 1 cm+ 1 ppm (RMS) Vertikalno: 2 cm+ 1 ppm (RMS)
Brzina ažuriranja pozicioniranja (engl. <i>Positioning Update Rate</i>)	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz i 20 Hz
Vrijeme ponovnog snimanja (engl. <i>Recapture Time</i>)	< 1 s
Pouzdanost inicijalizacije (engl. <i>Initialization Reliability</i>)	> 99,9%
Format podataka (engl. <i>Differential Data Format</i>)	RTCM 2.X/3.X
IMU	
Značajke	Ugrađeni 6-osni akcelerometar visoke preciznosti <i>D-RTK 2</i> za mjerenje pokreta Mjerenje nagiba <i>Electronic bubble level</i>
Fizičke karakteristike	
Dimenzije	168 mm × 168 mm × 1708 mm

(D-RTK 2 s produžnom šipkom)	
Komunikacijska udaljenost	
Način rada 4 Između letjelice i mobilne stanice: NCC/FCC: 7 km; SRRC/MIC/KCC/CE: 5 km Između daljinskog upravljača i mobilne stanice: 200 m (Neometano i bez smetnji na nadmorskoj visini od oko 120 m, kada je udaljenost od D-RTK 2 antene do dna stativa je 1,8 m, a kada je daljinski upravljač 1,2 m iznad razine tla)	
Električne karakteristike	
Potrošnja energije	12 W
Napajanje	16,5 do 58,8 V DC
Baterija	Tip: Litij-ionska baterija Kapacitet: 4920 mAh Energija: 37,3 WH
Vrijeme trajanja	Baterija WB37: > 2 h MG-12000P baterija: > 50 h
Radna temperatura	
Raspon radne temperature	-20 ° do 55 ° C

Izvor: (DJI, 2020)

Prema službenim karakteristikama točnost pozicioniranja u *single point* modu horizontalno iznosi 1,5 m, a vertikalno 3 m. Buonanno, (2019) navodi „D-RTK 2 ne može izračunati u realnom vremenu vlastitu lokaciju u centimetarskoj razini; stoga samo izračunava prosječnu poziciju (*engl. pseudorange, code-based*) s točnošću od 1.5 m (*engl. single point positional accuracy*). Nadalje, u drugom operativnom načinu rada navodi se da se D-RTK 2 može koristiti kao stacionarna bazna stanica, međutim na nekoliko objava u DJI Forumu je istaknuto da „točnost D-RTK 2 nije dovoljno dobra za stacionarnu stanicu te da se s njom ne mogu prikupljati OT“ (URL 18).



Slika 12. Mobilna stanica D-RTK 2

Izvor: URL 10

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

4.1. Spajanje UAV-a sustava

4.1.1 Montiranje D-RTK 2 mobilne stanice

U donjem tekstu u nekoliko je koraka opisana procedura postavljanja *D-RTK 2* mobilne te spajanja stanice s *Matricom 210 RTK V2*. Spajanje je izvršeno prateći službeni korisnički vodič *D-RTK 2* (DJI, 2020), autore Taddia i dr. (2019), koji su izveli slično istraživanje u kojem su ispitivali točnost *Phantoma 4 RTK* primjenom *D-RTK 2*, te uputu (Buonanno, 2019) nastalu kao sintezu objava korisnika s *DJI Foruma* od trenutka objavljivanja *D-RTK 2*.

Postavljanje D-RTK 2 mobilne stanice

D-RTK 2 mobilna stanica je postavljena na otvoreni, povišeniji prostor jaruge te je stabilizirana pomoću odgovarajućeg tronošca koristeći se ugrađenim nivelom (Slika 13B). Otvoreni prostor u ovom slučaju podrazumijeva okruženje bez zapreka (visoka vegetacija, brda, zgrade) unutar zone više od 15 stupnjeva iznad vodoravne ravnine antene *D-RTK 2* kako bi se spriječilo blokiranje GNSS signala.

Prema korisničkom vodiču lokacija postavljanja *D-RTK 2* je udaljena > 200 m od izvora radio emisija velike snage i najmanje 50 m udaljena od visokonaponskih dalekovoda kako bi se izbjegle elektromagnetske smetnje u GNSS signalu. Nakon postavljanja *D-RTK 2* nije pomicana.

Povezivanje sa satelitskim navigacijskim sustavima

DJI WB37 baterija je napunjena i montirana u *D-RTK 2* mobilnu stanicu (Slika 13B). Na *power* gumbu je upaljena te je nakon dvije minute *power* indikator pokazivao konstantno zeleno svjetlo. Navedeno ukazuje na to da je *D-RTK 2* spojena na ≥ 10 satelita.

Odabir načina rada

Potom je odabran (4.) operativni način rada koji je namijenjen za rad s *Matricom 210 RTK V2*. Način rada je odabran tako da je četiri puta kliknut gumb *Operation Mode*. Indikator svjetla je potom proizvodio 4 zelena blinkanja što ukazuje na odabrani način rada (Slika 13A).



Slika 13. Montirana D-RTK mobilna stanica

Povezivanje s Matricom 210 RTK V2

Nakon postavljanja (4.) načina rada izvršeno je spajanje D-RTK 2 s Matricom 210 RTK V2 (Slika 14). Matrice 210 RTK V2 je upaljen i povezan s daljinskim upravljačem. Potom su kliknuti gumbi za povezivanje na D-RTK 2 mobilnoj stanici i Matricu 210 RTK V2. Povezivanje je uspješno ako svjetla indikatora konstantno svijetle zelenom bojom, kvaliteta povezivanja je $> 70\%$ (Slika 13A).



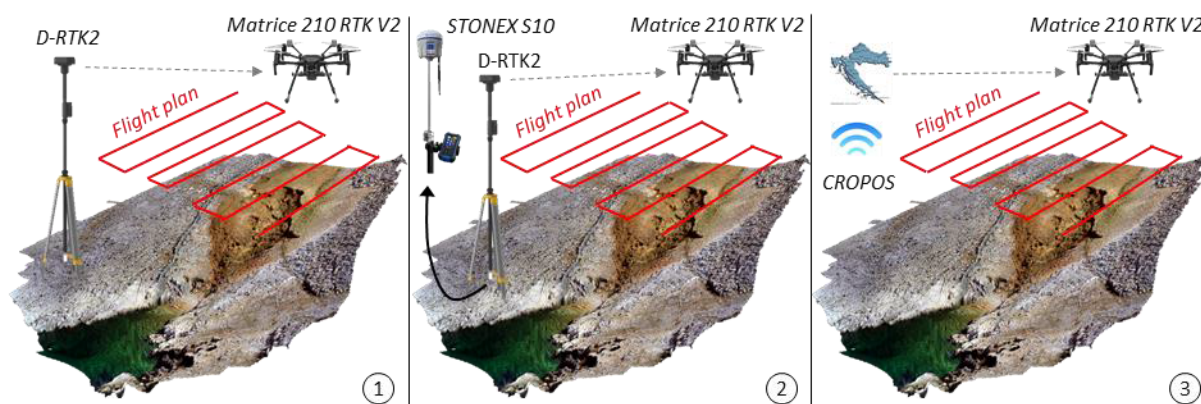
Slika 14. Spajanje UAV sustava (*Matrice 210 RTK V2 + Zenmuse X7 16 mm*)

Aktivacija D-RTK 2

Prije prvog korištenja nužno je aktivirati D-RTK 2 mobilnu stanicu i ažurirati ugrađeni program (engl. *firmware*). Ugrađeni programi su ažurirani u *DJI Assistant 2* (URL 6) programu. D-RTK 2 mobilna stanica je spojena s laptopom. Potom je pokrenut *DJI Assistant 2* te je izvršeno ažuriranje ugrađenog programa. Aktivacija D-RTK 2 mobilne stanice je u aplikaciji DJI GO. U DJI GO aplikaciji osposobljena je RTK funkcija. Potom je odabrana opcija *D-RTK 2 Mobile Station* pod *RTK service type*. Nakon aktivacije D-RTK 2 i povezivanja s Matricom 210 RTK V2 antena je ostavljena u fiksnom položaju preko 5 min s ciljem što bolje inicijalizacije.

Odabir opcije RTK pozicioniranja

Ako nakon povezivanja D-RTK 2 i UAV-a s daljinskim upravljačem u gornjem lijevom kutu glavnog zaslona piše poruka *Ready to Takeoff* (RTK) (sa zelenom pozadinom) i GNSS status je promijenjen u „FIX“. U radu su testirana tri načina rada izravnog georeferenciranja *Matrica 210 RTK V2* koristeći opciju RTK pozicioniranja (Slika 15). Prvi se odnosi na primjenu D-RTK 2 kao bazne stanice, drugi na korekciju koordinata koristeći baznu stanicu treće strane, u ovom slučaju STONEX S10 te treći način koristeći CROPOS sustav.



Slika 15. Testirana tri načina izravnog georeferenciranja

4.1.1.1 D-RTK 2 - BAZNA STANICA

Prvi način se odnosi na korištenje koordinata D-RTK 2 (Slika 15) koje je samostalno izmjerila. Ova metoda koristi samo baznu stanicu D-RTK 2 za prijenos RTK ispravnih informacija izravno u UAV, a postupak je izrazito jednostavan: bazna stanica se uključi i automatski poveže s kontrolerom i UAV-om. Primarna je korist ovog tijekom rada to što se vrlo jednostavno postavlja i rijetko ima značajnije greške koje bi zahtijevale ponovni posjet terenu. Ako se RTK signal prekine, na kontroleru se odmah dobije informacija. Nadalje, ovaj tijekom rada

ne zahtijeva internetsku vezu. Buonanno (2019) za ovaj način rada navodi da su koordinate izračunate pomoću D-RTK 2 metričke razine točnosti. Misija leta bit će praćena s centimetarskom preciznošću, no točna pozicija svake snimljene fotografije bit će na razini metra. Ako se koriste zadane koordinate izmjerene s D-RTK 2 u Z vrijednost se ne mora dodavati visina antene (Buonanno, 2019). *Aerotas*, firma koja se bavi različitim uslugama za UAV fotogrametriju, navodi da ova metoda osigurava izrazito visoku točnost i pouzdanost uz veoma jednostavnu primjenu (URL 15).

4.1.1.2 D-RTK 2 - KOREKCIJA KOORDINATA - BAZNA STANICA TREĆE STRANE

U drugom načinu precizno određivanje koordinata D-RTK 2 je izvršeno na način da je korišten GNSS prijammik STONEX S10 (Slika 15) koji je, pomoću odgovarajućeg stativa montiran na lokaciju predviđenu za D-RTK 2. Nakon inicijalizacije prijammika, mjerenje točke na kojoj je bila montirana D-RTK 2 je trajalo 2 min (10 epoha mjerenja). Dakle, ako postoji točka s poznatim koordinatama, D-RTK 2 se postavi točno na tu točku, a zatim unesu (ispravljene) koordinate u aplikaciju. U DJI GO aplikaciji kliknuto je na RTK postavke (engl. *RTK Settings*) te potom na napredne postavke. Postavke ovise o tipu proizvoda koji se koristi s D-RTK 2 mobilnom stanicom, u ovom slučaju radi se o *Matricu 210 RTK V2*. Unesene su izmjerene koordinate (STONEX S10) na predviđena mjesta. U slučaju da se ubačene koordinate razlikuju od stvarnih koordinata D-RTK 2 dalje od 50 m, za 4. i 5. način rada, one neće biti prihvaćene (URL 7). Budući da u aplikaciji nema mjesta za unos visine antene, na izmjerenu Z vrijednost mora se dodati visina antene (1,802 m) (Buonanno, 2019). Visina antene izračunata je na sljedeći način: stativ osiguran od strane DJI ima visinu od 1,660 m od kraja do dna antene. Dodavanjem udaljenosti između baze antene i faznog središta antene (0,1419 m - navedeno na dijagramu nacrtanom na tijelu stanice) dobiva se vrijednost 1,802 m koja se dodaje referentnoj visini u postavci DJI GS RTK. Sumirano, unesene su izmjerene koordinate koje predstavljaju fazno središte antene (APC²⁵) D-RTK 2. Ovaj način rada se koristi ako se želi doseći centimetarska točnost metra (Buonanno, 2019).

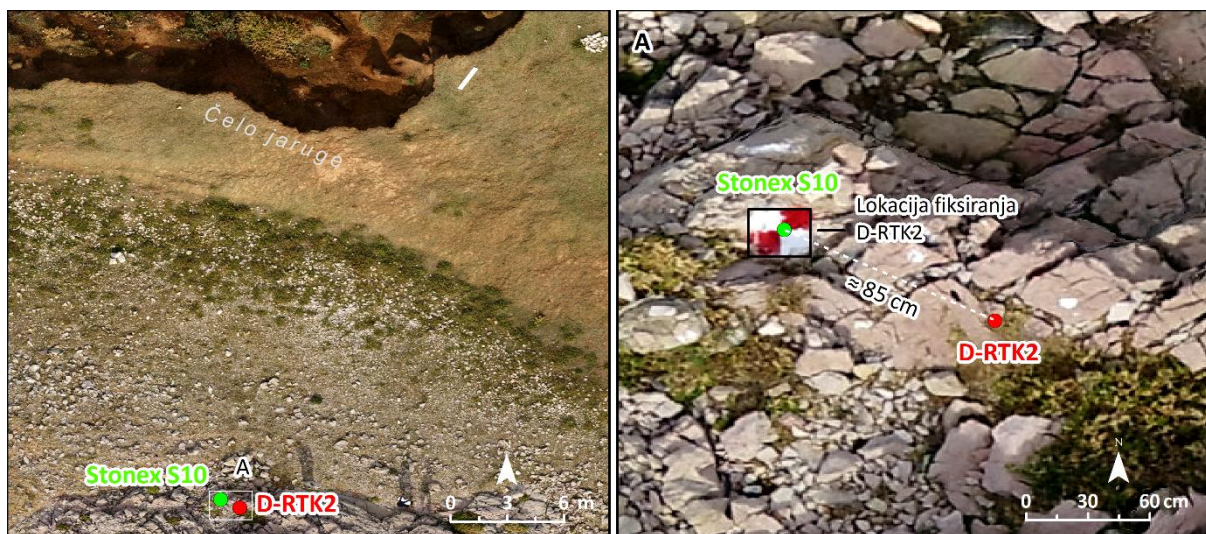
U Tablici 6. prikazane su razlike u koordinatama lokacije na kojoj je bila montirana mobilna stanica D-RTK 2 izmjerene pomoću Stonexa S10 i same stanice. Razlike u očitanoj visini antene (APC) iznose 38,6 cm. Dakle, D-RTK 2 je za gotovo 40 cm niže izmjerila visinu antene. Razlike za geografsku dužinu iznose oko 73,3 cm, a za širinu 43,9 cm. Dakle, pretpostavka je da će model generiran izravnim georeferenciranjem koristeći prvi način rada,

²⁵ Antenna Phase Centre

odnosno gdje se samo D-RTK 2 koristi kao bazna stanica, odstupati od modela izvedenog klasičnim pristupom u sličnim vrijednostima (long $\approx 73,3$ cm, lat $\approx -43,869$, elev $\approx 38,600$).

Tablica 6. Razlike u koordinatama mobilne stanice izmjerene s D-RTK 2 (1. način rada) i Stonex-om S10 (2. način rada)

WGS84	X (dd)	Y (dd)	Z (m)
DRTK2	15,19281974	44,37452990	69,331
STONEXS10	15,19281054	44,37453387	69,717
RAZLIKA (cm)	73,366	-43,869	-38,600



Slika 16. Geokodirana razlika u lokaciji fiksirane mobilne stanice D-RTK 2 očitane pomoću Stonexa S10 i D-RTK 2 (podloga DOF izveden koristeći 10 OT-a)

Stanica D-RTK 2 očekuje koordinate geografske dužine i širine u decimalnim stupnjevima (DD^{26}), a nadmorsku visinu kao elipsoidnu visinu (h) (engl. *height above ellipsoidal height* - HAE). U teoriji bi moglo biti moguće unijeti ortometrijsku visinu (H) umjesto elipsoidne visine, međutim to nije preporučljivo, zbog javljanja moguće pogreške istaknute gore u tekstu. Nadalje, potrebno je istaknuti da svaki put kada se ručno postavljaju koordinate D-RTK 2 one se spremaju u unutarnju memoriju prijavnika GNSS. Ako u ovom procesu ponovno pokrenete D-RTK 2, stanica ponovno izračunava svoj (zasnovan na kodu) prosječni položaj, ako razlika u udaljenosti između korektivnih i ponovno procijenjenih koordinata bude veća od 5 metara unos neće raditi, odnosno korektivne koordinate neće biti spremljene. Koordinate OT-a i CP-a korištenih za izvođenje modela klasičnim pristupom te za

²⁶ Decimal Degrees

provjeru točnosti modela izvedenih izravnim georeferenciranjem su prikupljene u istom koordinatnom sustavu.

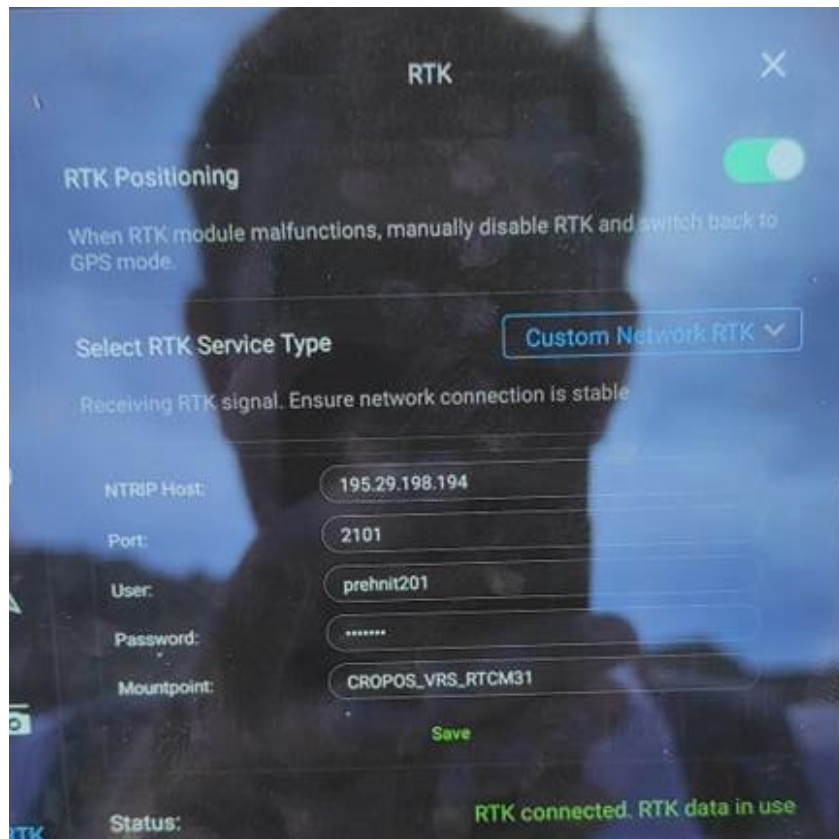
4.1.1.3 MREŽNE NTRIP KOREKCIJE - CROPOS

U trećem načinu rada korištena je opcija NTRIP²⁷ spajanja (Slika 17). Prema (Buonanno, 2019) trenutno D-RTK 2 nije u stanju u stvarnom vremenu izračunati vlastiti položaj na razini centimetara (način RTK-a putem NTRIP-a još nije implementiran); posljedično, izračunava samo prosječni položaj (engl. *pseudorange, code-based*) s točnošću od oko 1,5 m (engl. *single point positional accuracy*). U prethodnom tekstu je spomenuto da je zadani koordinatni sustav koji koristi stanica D-RTK 2 WGS84. No, kada odaberete RTK opciju "*Custom network RTK*", izlazni koordinatni sustav, i stoga referentni elipsoid, bit će onaj odabrane NRTK²⁸ usluge "mount point" (Buonanno, 2019).

Ova metodologija koristi NTRIP bez bazne stanice bilo koje vrste te primjenom NTRIP streama spojenog na internet daje RTK podatke uživo. Ovaj proces zahtijeva internetsku vezu na mjestu snimanja putem lokalnog Wi-Fi-a, žarišne točke ili namjenskog 4G priključka na kontroler. Prednost ove metode je ta što korištenje mrežnog tijekom rada zahtijeva najmanju količinu fizičke opreme na lokaciji snimanja. Najveći nedostatak je potreba za aktivnom, pouzdanom internetskom vezom. Čak i kada postoji dobra mobilna veza, kratki prekid internetske veze može uzrokovati probleme. Mogu se pojaviti i neke poteškoće pri prijavljivanju na mrežne NTRIP veze, što uzrokuje probleme u jednostavnosti korištenja. Međutim, ako se snima lokacija u visoko razvijenim, urbanim područjima, onda je ovo možda optimalno rješenje (URL 15).

²⁷ Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

²⁸ Network Real Time Kinematic



Slika 17. Spajanje na CROPOS_VRS_RTCM31

Pokretanje Matrice 210 RTK V2

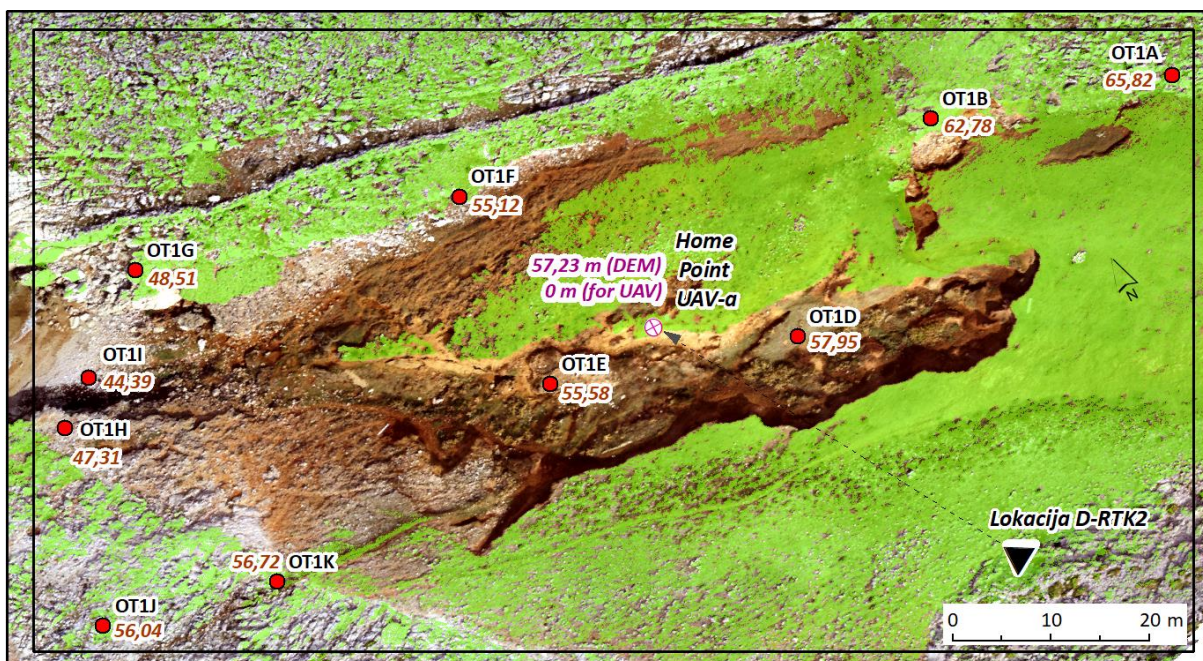
Nakon svih izvršenih koraka pokrenut je *Matrice 210 RTK V2* (Slika 18). Pokretanje motora se vrši ako je RTK ikona u FIX načinu rada ili je status orijentacije i pozicioniranja UAV-a u tablici statusa postavki RTK u FIX načinu rada. Prilikom leta ako se D-RTK 2 pomakne ili ugasi RTK, letjelica se prebacuje u GNSS način rada te može ponovno ući u RTK FIX status.



Slika 18. Matrice 210 RTK V2 u misiji

Prije izvođenja snimanja odabrana je primjerena lokacija za podizanje UAV-a. Unutar prostora jaruge (Slika 19) razlika između najviše (OT1A) i najniže (OT1I) orijentacijske točke iznosi 21,43 m. U idealnim okolnostima UAV bi u letu trebao pratiti konfiguraciju terena kako bi zadržao uniformno mjerilo. Primjerice, da je UAV poletio u blizini OT1A, na samom čelu jaruge bi bio na visini 30 m od tla, dok bi iznad samog dna jaruge, u trenutku preletavanja OT1I, bio na visini (udaljenosti) od 51,43 m. U tom slučaju prostorna rezolucija iznad OT1A bi iznosila $0,78 \text{ cm}^2$ ²⁹, dok bi u dnu jaruge iznosila 1,34 cm (razlika 0.56 mm). Iako razlika nije velika, problem se može riješiti korištenjem naprednih programa za planiranje misija koji imaju mogućnost integracije točnih DMR-ova čiju hipsometriju UAV može konstantno pratiti zadržavajući istu udaljenost (30 m) od terena. Međutim, pretražujući forume DJI-a utvrđeno je da *Matrice 210 RTK V2 + D-RTK 2* sustav trenutno ne podržava korištenje takvih programa. Ipak, s ciljem minimalizacije tog problema, lokacija polijetanja (engl. *home point*) je postavljena otprilike u sredinu jaruge (57,23 m), u blizini točke OT1E.

Nadalje, zbog povezivanja UAV-a i mobilne stanice D-RTK 2 lokacija polijetanja je morala biti vidljiva s lokacije stanice. Stoga je prije terena napravljena analiza vidljivosti (engl. *Viewshed Analysis*) u GIS-u. Na lokaciju montiranja mobilne stanice D-RTK 2 dodana je točka s parametrom OFFSETA = 1,802 m, koji predstavlja visinu antene. Odabrana je lokacija po sredini jaruge vidljiva s mobilne stanice D-RTK 2 (Slika 19).

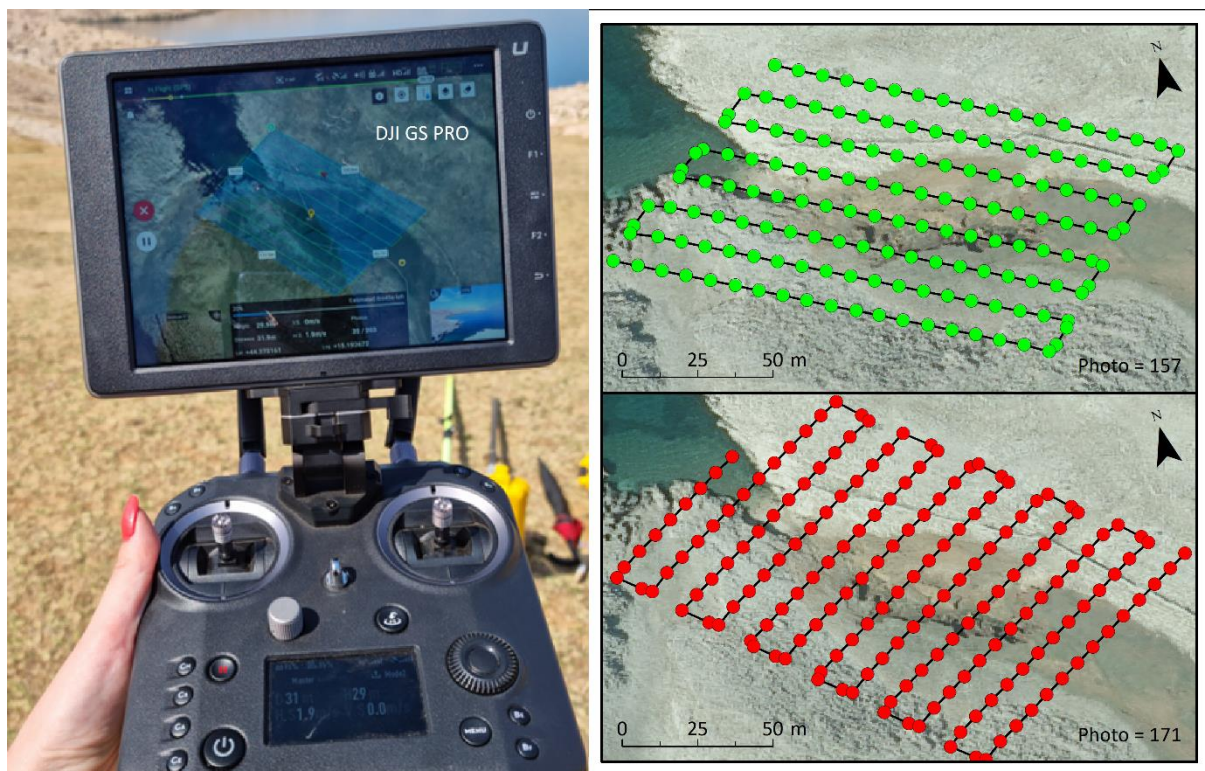


Slika 19. Odabir lokacije za podizanje UAV-a (*Home Point*)

²⁹ Izračunato pomoću Pix4D_GSD_Calculator

Planiranje UAV misija

Misija je isplanirana u aplikaciji *DJI Pilot*. S obzirom na to da aplikacija ne podržava izvođenje *double grid* misija, isplanirane su dvije *single grid* misije (Slika 20) s prednjim i bočnim preklopom fotografija od 80%. Visina leta je postavljena na 30 m. *DJI Pilot* je moderna i profesionalna aplikacija namijenjena za upravljanje DJI bespilotnim letjelicama (URL 12). *DJI Pilot* pruža razne mogućnosti rada UAV-om, prijenos slike u stvarnom vremenu, upravljanje UAV-om i kamerom, planiranje i automatizaciju složenih letova (URL 12), s funkcijama dodavanja međutočaka, 3D rekonstrukcijom, kosim fotografiranjem itd. (URL 13).



Slika 20. Geokodirane lokacije fotografija *single grid* misija

Predložena brzina leta u misiji je iznosila 2.9 m/s, međutim navedena vrijednost je smanjena na 2 m/s s ciljem dobivanja kvalitetnijih snimki, odnosno izbjegavanja potencijalnih zamućenja na rubovima misija u trenutku kad UAV naglo zakrene. U postavkama odabira kamere nije predložen automatski odabir Zennair X7 16 mm objektiva. Stoga su ručno upisane postavke (rezolucija senzora, širina i dužina senzora, veličina piksela, žarišna udaljenost) te je dodan novi objektiv.

Postavke UAV kamere

Nadalje, postavke kamere prilikom snimanja fotografija su prilagođene prateći primjere dobre prakse. ISO bi idealno trebao biti postavljen na minimalnu vrijednost potrebnu za

osiguranje dobre ekspozicije. Tipične ISO vrijednosti za snimanje iz zraka su od 100 do 800. Snimanje na većim vrijednostima dovodi do manjeg dinamičnog raspona i povećanja šuma na fotografiji, što može negativno utjecati na obradu snimki (O'Connor i dr., 2017). U svim načinima snimanja ISO vrijednost je bila postavljena na 100. Odabrana ISO vrijednost utječe na odabir brzine zatvarača (engl. *shutter speed*) stoga obje vrijednosti, u skladu s brzinom leta, moraju biti određene da osiguraju dobru ekspoziciju uz izostanak zamućenja fotografije (engl. *motion blur*). U literaturi se brzina zatvarača u UAV snimanjima kreće od 1/250 do 1/1000, gdje sporija brzina povećava vjerojatnost od pojave zamućene fotografije (O'Connor i dr., 2017). S obzirom na to da je brzina leta UAV smanjena s predloženih 2,9 m/s na 2 m/s, brzina zatvarača je postavljena na 1/640. Posljednji parametar je otvor blende (engl. *aperture*) koji regulira dubinu polja (engl. *depth of field*). Za snimanja na visinama većim od <20 m, efektivni otvor blende može biti od f/5.6 do f/11 (O'Connor, 2017). U izvedenim snimanjima odabran je *shutter priority* (S) način snimanja u kojem se otvor blende automatski (dinamički) podešava s ciljem održavanja vrijednosti ekspozicije (0,0). Provjeravajući vrijednosti otvora blende u EXIF podacima fotografija utvrđeno je da vrijednost gotovo u potpunosti odgovara navedenom rasponu vrijednosti u literaturi. Odabrano je ručno fokusiranje (engl. *manual focus* - MF) koji je postavljen na beskonačno (engl. *infinity*). Naime, za većinu UAV snimanja, osim za onih koji se provode na jako malim visinama, fokus se postavlja na beskonačno (O'Connor, 2017). Navedeno je napravljeno i u ovom slučaju. U *shutter priority* načinu snimanja kamera koristi postavke ekspozicije, odnosno zadani ekspozicijski broj (engl. *exposure value* - EV) kako bi odredila vrijednosti postavljanja otvora blende i ISO-a. Navedeni parametri se postavljaju s ciljem osiguranja dovoljne količina svjetlosti koja bi omogućila postizanje EV postavke (0,0). Definirane postavke su rezultirale izoštranim fotografijama. Njihova kvaliteta je provjerena u Agisoftu kroz opciju *Image quality*. Vrijednost kvalitete fotografija se u svim načinima snimanja kretala od 0,8 do 1, što prema Agisoft uputama predstavlja vrlo visoku kvalitetu.

Postavljanje manjih testnih uzoraka

S ciljem provjere relativne točnosti različitih načina rada (GNSS UAV, D-RTK 2, STONEX S10 korekcija, mrežna NTRIP korekcija) na četiri lokacije unutar jaruge su postavljene dvije pločice i dva laminata. Prva pločica je postavljena u blizinu OT1E orijentacijske točke, a izmjerena referentna površina joj je $60 \times 60 = 3600 \text{ cm}^2$. Druga pločica je postavljena u blizinu lokacije s koje je UAV polijetao i referentna površina joj je 1800 cm^2 . Prvi laminat je postavljen na zaravnjen prostor na samom vrhu jaruge, a referentna površina mu

je $130 * 20 = 2600 \text{ cm}^2$. Drugi laminat je smješten na kosi, bočni dio jaruge te mu je koristeći aplikaciju *Clinometar* izmjeren prosječan nagib od $27,1^\circ$. Cilj je bio utvrditi hoće li s povećanjem nagiba odstupanje u površini plohe biti veće. Usporedbom referentnih i procijenjenih vrijednosti svakog objekta izračunata je postotna pogreška (PE) za testirane načine RTK pozicioniranja.



Slika 21. Dio postavljenih referentnih pločica i laminata

4.2. Označavanje orijentacijskih točaka

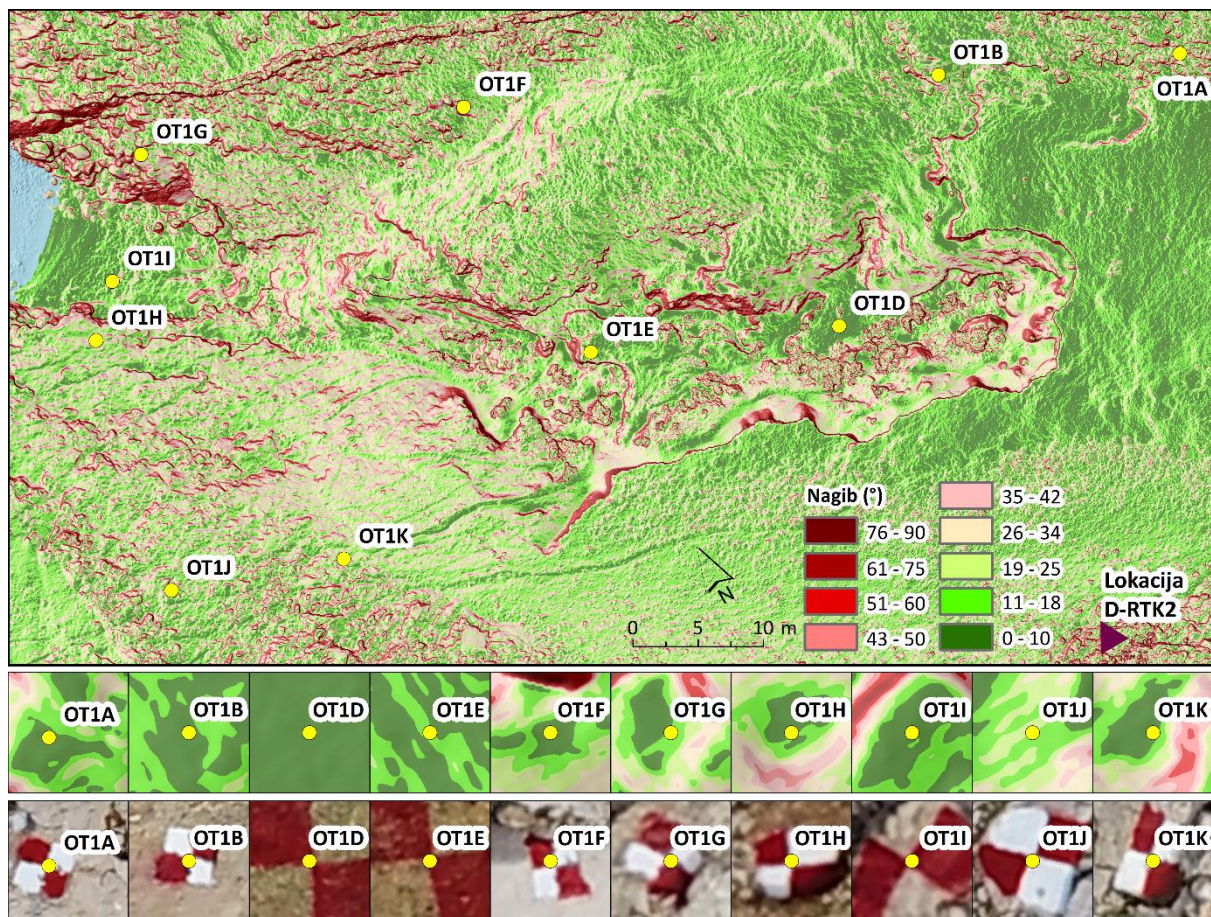
Smanjivanje sustavne pogreške digitalnog modela površina (DMP) (engl. *Digital Surface Model – DSM*) postiže se georeferenciranjem zračnih fotografija na temelju fiksnih orijentacijskih točaka (OT) (engl. GCP³⁰) raspoređenih unutar cijelog prostora istraživanja. Broj OT-a određen je sljedeći primjere dobre prakse (James i dr., 2017, 45, Oniga i dr., 2018, 103), dok je raspored točaka određen s nekoliko faktora (James i dr., 2017). Prvi se odnosi na tip zemljišnog pokrova koji prevladava na području istraživanja. Naime, prostorom dominira plitko smeđe tlo koje je izuzetno dinamično i podložno erozijskim djelovanjima (Slika 21).



Slika 21. Zemljišni pokrov na području jaruge

³⁰ Ground control point (GCP)

Nadalje, određeni dijelovi jaruge su izrazito vertikalno raščlanjeni s velikim nagibom što otežava proces označavanja i prikupljanja orijentacijskih točaka (Slika 22). Većina orijentacijskih i kontrolnih točaka u prostoru istraživanja označeno je na ograničenim stjenovitim površinama, koje obilježavaju mali nagibi površine.



Slika 22. Lokacije prikupljenih OT-a i CP-a u odnosu na model nagiba

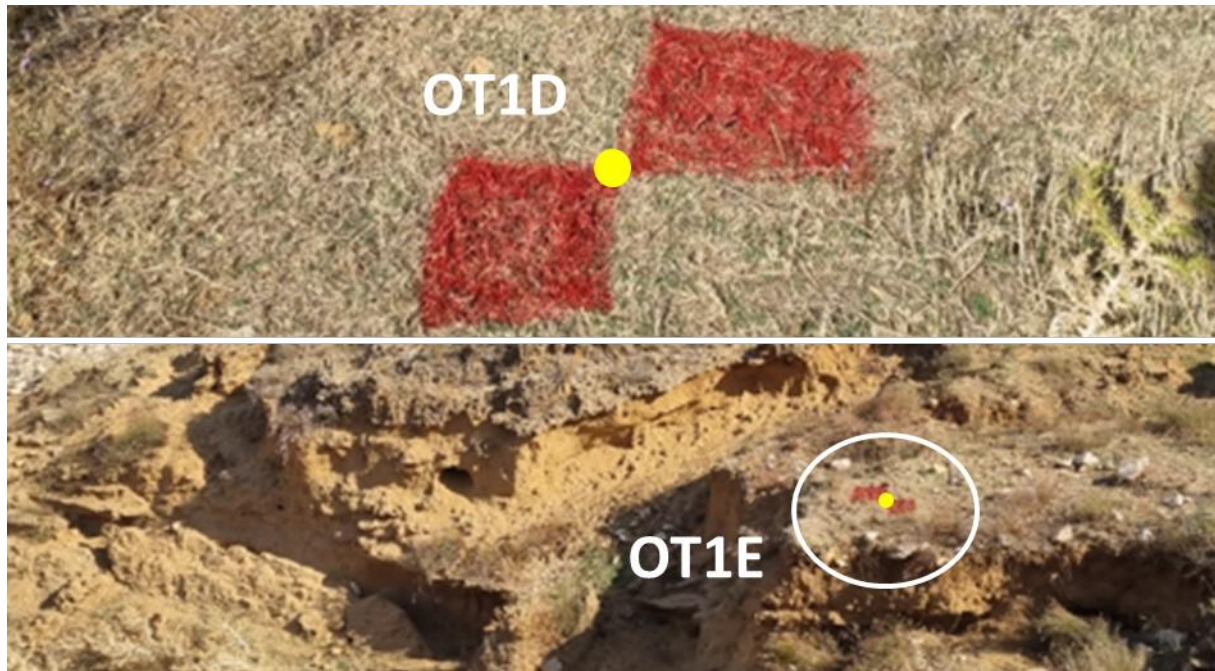
Na području istraživanja zbog provjere točnosti izvedenih načina rada označeno je i prikupljeno ukupno 10 kontrolnih/ orijentacijskih točaka, klasificiranih ovisno o tome koji se model izvodi. Referentni je model, na temelju kojeg je napravljena usporedba s ostalim načinima snimanja, izveden na dva načina. U prvom svih 10 točaka su korištene kao OT. U drugom, 6 točaka je korišteno kao OT dok su ostale 4 korištene kao kontrolne točke (engl. *Check Point* – CP). Svrha drugog načina označavanja je bila provjeriti točnost referentnog modela.



Slika 23. (A) Zaštita OT-a; (B) čišćenje OT-a te (C) označavanje OT-a

Određeni broj označenih OT-a na stijenskoj podlozi korišteno je u istraživanju Domazetović i dr., (2019) kao stajališta za terestrički laserski skener (TLS). Navedene točke su bile zaštićene s vodonepropusnom folijom te gipsanim poklopcima. Dolaskom na teren zaštita s točaka je uklonjena (Slika 23), u slučaju da je došlo do nakupljanja tla, kamenja ili prašine podloga točke je očišćena te je potom izvedeno ponovno označavanje. Točke su označene kao kvadrati istaknutom crvenom bojom te bijelom farbom. Okvirne dimenzije točaka su bile 30 cm * 30 cm, uvažavajući očekivanu prostornu rezoluciju (GSD) modela. Uz točke označene na stijenskoj podlozi, tri točke su naknadno označene na zaravnjenom, nešto

tvrđem, smeđem tlu u sredini jaruge te na većem kamenu u samom podnožju jaruge u blizini obale (Slika 24).

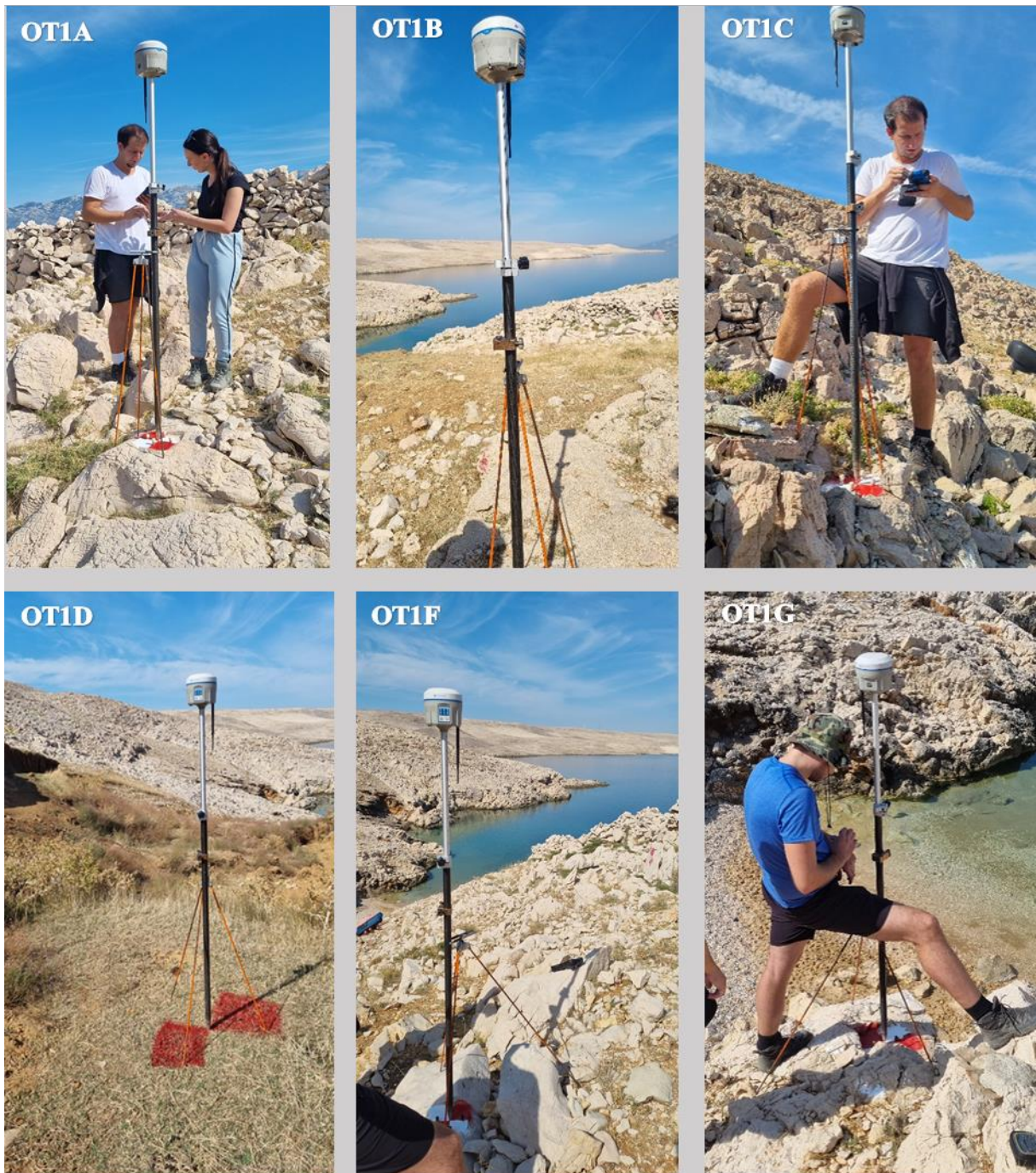


Slika 24. Točke označene na smeđem tlu u sredini jaruge

4.3. Prikupljanje orijentacijskih i kontrolnih točaka

Koordinate OT-a i CP-a su prikupljene (Slika 25) koristeći STONEX S10 GNSS prijamnik koji u RTK načinu rada ima vodoravnu preciznost od 0,8 cm i vertikalnu preciznost od 1,5 cm te tronožac za stabilizaciju. Naravno, navedene vrijednosti ovise o snazi mreže te blizini bazne stanice (URL 16). Prilikom korištenja CROPOS VPPS servisa ostvarena je inicijalizacija. OT i CP su, zbog logističkih ograničenja, izmjerene u jednom neovisnom mjerenju. Nakon inicijalizacije prijamnika mjerenje točaka je trajalo 2 min (10 epoha mjerenja) s elevacijskim kutom od 15°. Koordinate geografske dužine i širine označenih OT-a i CP-a su prikupljene u WGS84 koordinatnom sustavu u decimalnim stupnjevima (DD), dok je nadmorska visina prikupljena kao elipsoidna visina³¹. Navedeni koordinatni sustav te način prikupljanja Z vrijednosti su odabrani s ciljem usklađivanja s načinom prikupljanja koordinata fotografija u pristupu izravnog georeferenciranja. S time su se nastojale izbjeći potencijalne greške koje su se mogle javiti u procesu transformacije i usklađivanja koordinatnih sustava. Navedeni problem je u istaknut na forumu DJI-a (URL 17).

³¹ Prilikom prikupljanja točaka STONEX-om S10 isključena je korekcija geoidne undulacije.



Slika 25. Prikupljanje OT-a i CP-a koristeći STONEX S10 GNSS

4.4. Obrada UAV snimki

UAV snimke obrađene su pomoću *Agisoft Metashape 1.5.1.* naprednog softvera za 3D modeliranje koji se temelji na izradi kvalitetnih 3D modela iz fotografija. *Agisoft Metashape* primjenjuje tehnologiju 3D rekonstrukcije iz više fotografija (engl. *multi-view 3D reconstruction technology*). Generiranje modela izvodi se na osnovi rekonstrukcije preklapajućih fotografija, snimljenih s bilo kojeg položaja. Primarni zadatak obrade fotografija

s *Agisoft Metashape-om* je generiranje 3D modela, digitalnih modela površina DEM-a (engl. *digital elevation model*) te digitalne ortofotokarte (DOF). Proces obrade fotografija sastojao se od deset glavnih koraka:

- (1) Provjera kvalitete fotografija
- (2) Postavke točnosti kamere
- (3) Poravnavanje ili spajanje fotografija (engl. *align photos*)
- (4) Gradualna selekcija (engl. *gradual selection*) i optimiziranje položaja kamere (fotografija)
- (5) Dodavanje orijentacijskih (OT) i/ili kontrolnih točaka (CP) - ovisno o načinu snimanja
- (6) Izgradnja gustog oblaka točaka (engl. *dense cloud*)
- (7) Izgradnja poligonalne mreže (engl. *build mesh*)
- (8) Teksturiranje poligonalne mreže (engl. *build texture*).
- (9) Izgradnja DEM-a
- (10) Izgradnja DOF-a

4.4.1 Provjera kvalitete fotografija

Prije procesa obrade fotografija bilo je nužno provjeriti kvalitetu svih UAV snimki primjenom *Agisoftove* opcije automatske procjene kvalitete fotografije (engl. *image quality*). Naime, mutne fotografije negativno utječu na rezultate spajanja i teksturu modela, zbog čega je važno da svaka fotografija bude oštra, odnosno u fokusu. U fotogrametrijskoj obradi preporučuje se izuzimanje svih fotografija čije su vrijednosti kvalitete manje od 0,5 pod uvjetom da preostale fotografije pokrivaju cijeli objekt ili scenu snimanja. Stoga je procijenjena kvaliteta svih fotografija, a izostavljene su one fotografije čija je vrijednost kvalitete $< 0,5$.

4.4.2 Postavke točnosti kamere

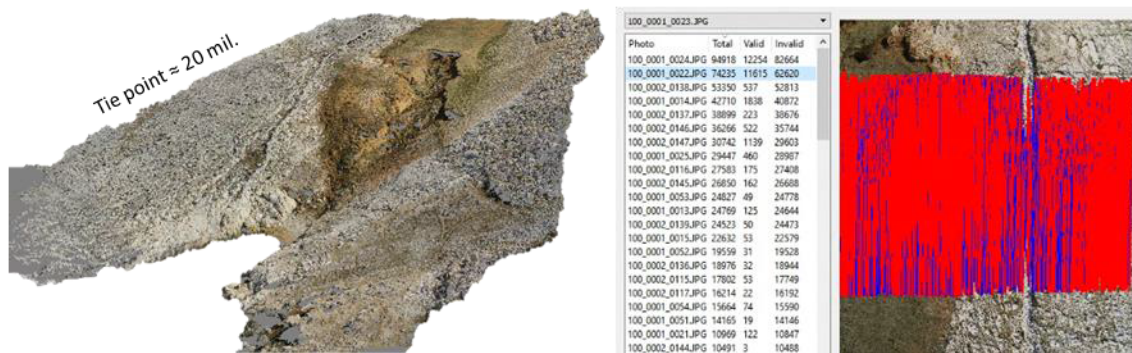
Nadalje, u postavkama su unesene vrijednosti, koje odražavaju točnost korištenih instrumenata (GNSS/ IMU) s UAV-a. (URL 11). Parametar točnosti kamere (m) (engl. *camera accuracy*) odražava točnost mjerenja određenog uređaja koji se koristi. Ako se geografske oznake/ koordinate fotografija (engl. *geotag*) dobivaju iz regularnog GNSS uređaja s UAV-a vjerojatno će biti nepouzdana u rasponu od 2,5 do beskonačno, a zadanih 10 m smatra se fleksibilnim pristupom (URL 14). Stoga je u klasičnim pristupima, koji u ovom slučaju nisu koristili D-RTK 2, CROPOS sustav te koordinate izmjerene STONEX-om, već isključivo svoj integralni GNSS/IMU sustav, ostavljena zadana vrijednost parametra od 10 m. U drugim načinima snimanja koji su za pozicioniranje koristili D-RTK 2, CROPOS sustav te koordinate

izmjerene STONEX-om, u postavkama je umjesto inicijalnih 10 m, postavljena vrijednost od 10 cm s obzirom da sustav prema proizvođaču ima centimetarsku točnost pozicioniranja.

4.4.3 Spajanje fotografija

Prvi korak u procesu obrade je bilo poravnavanje ili spajanje fotografija (engl. *align photos*). Ono podrazumijeva traženje zajedničkih veznih točaka (engl. *tie points*) na svim fotografijama te njihovo usklađivanje. Rezultira rijetkim oblakom točaka (Slika 26) i procijenjenim intrinzičnim/unutarnjim kalibracijskim parametrima kamere (žarišna udaljenost, perspektivni centar, radijalna i tangencijalna distorzija, zakošenost pixela). Poravnavanje velikog skupa fotografija može biti izrazito dugotrajno. Ubrzanje navedenog procesa moguće je odabirom opcije predodabira parova fotografija (engl. *pair preselection*). Parametar *generic preselection* koristi postavku niske točnosti zbog brzog pronalaska parova fotografija s istim prikazom. Parametar *reference preselection* na osnovi izmjerenih lokacija (X, Y, Z) kamere (ako postoje) odabire preklapljene parove fotografija. Učinkovitost metode preselekcije ovisi o postavljanju odgovarajućih vrijednosti unutar postavki *reference preselection*.

Nadalje, opcija *key point limit* predstavlja gornju granicu broja veznih točaka (piksela) svake fotografije koja se uzima u obzir prilikom poravnavanja fotografija. Ako se postavi vrijednost nula, tad ona rezultira najvećim brojem točaka, uglavnom manje pouzdanih. Opcija *tie point* označava gornju granicu podudarajućih točaka za svaku fotografiju. Postavljanje vrijednosti nula u ovom slučaju, znači da se filter ne primjenjuje (Agisoft, 2019). U ovom koraku korišteni su parametri *generic* i *reference preselection*, a postavljene vrijednosti iznosile su 0 za *key point limit* i 0 za *tie point limit*. Navedene vrijednosti su postavljene za sve načine snimanja. Korištenje nulte vrijednosti omogućuje *Metashape-u* da pronađe što je moguće više točaka. *Tie point* je *key point* koja se može identificirati na dvije ili više fotografija koje se mogu koristiti za rekonstrukciju 3D modela. Korištenje 0 vrijednosti ne primjenjuje nikakvo filtriranje vezanih točaka pa može potrajati znatno vrijeme, ali se time mogu povezati i fotografije lošije kvalitete, fotografije sa slabijim preklapom ili prostor koji je teksturno veoma homogen. Izvođenje velikog broja veznih točaka koristeći ove postavke (0, 0), pruža korisniku mogućnost primjene gradualne selekcije bez straha od gubitka prevelikog broja veznih točaka.



Slika 26. Primjer izvedenih veznih točaka i podudarajuće točke na susjednim fotografijama

4.4.4 Gradualna selekcija

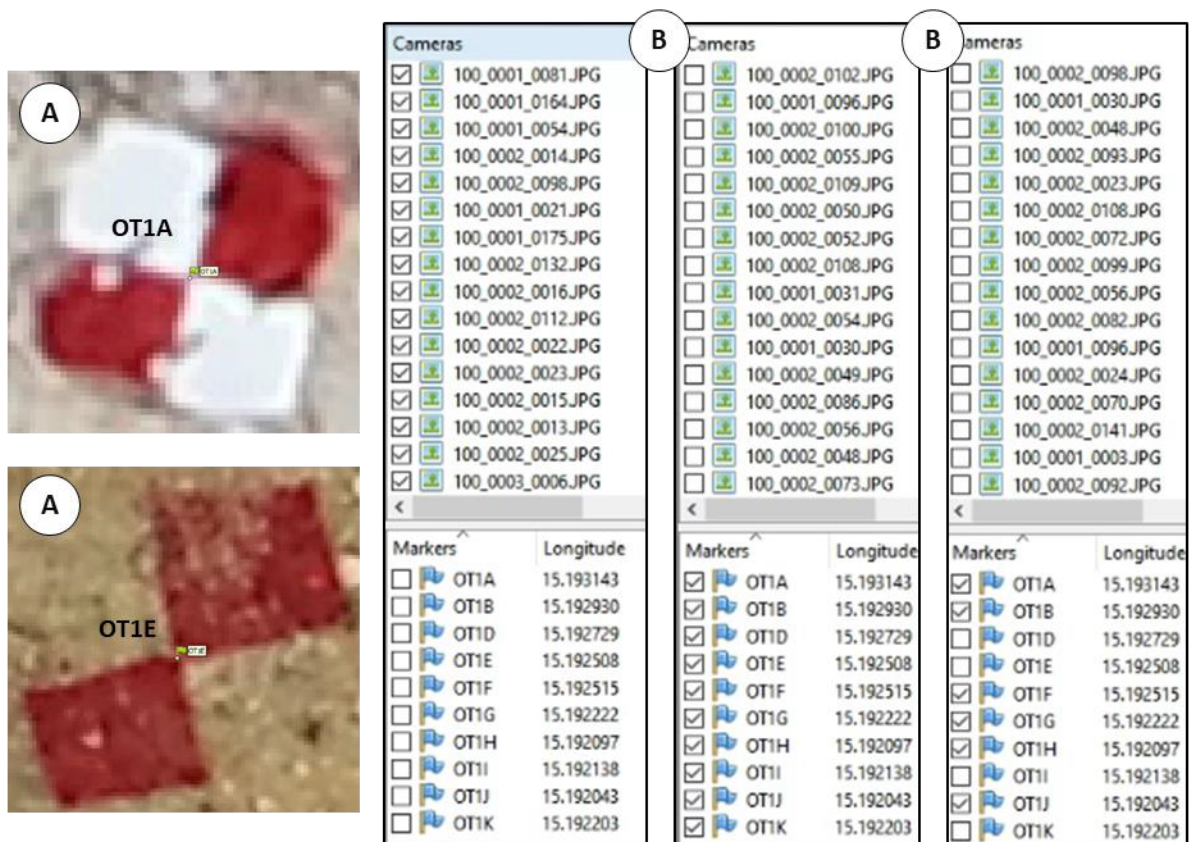
U prethodnom koraku generirano je oko 20 milijuna veznih točaka. Potom se na izvedenim točkama vrši gradualna selekcija prema odabranim parametrima. U gradualnoj selekciji su korišteni parametri nesigurnost rekonstrukcije (engl. *reconstruction uncertainty*) te pogreške reprojekcije (engl. *reprojection error*). Pogreške reprojekcije se odnosi na statističku grešku u rekonstrukciji točke iz 2D sustava u 3D sustav te je navedena u pixelima. Nesigurnost rekonstrukcije se odnosi na moguće varijacije u rekonstrukciji točke iz 2D sustava u 3D sustav. Općenito, ova vrijednost karakterizira točnost pozicioniranja točaka u oblaku. Sve vezne točke s reprojekcijskom pogreškom većom od 0,2 te nesigurnost rekonstrukcije većom od 20 su izbrisane (Slika 27). Nakon brisanja napravljena je optimizacija položaja kamere te ponovno procjena unutarnjih kalibracijskih parametara kamere.



Slika 27. Primjer gradualne selekcije veznih točaka

4.4.5 Dodavanje orijentacijskih (OT) i/ili kontrolnih točaka

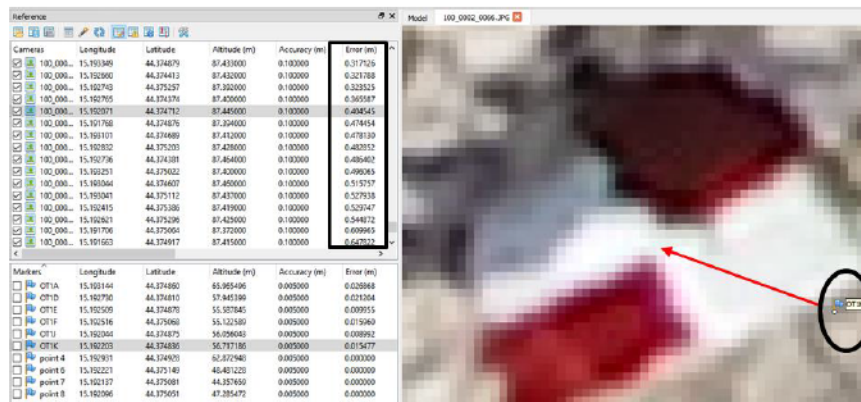
Na rekonstruirane vezne točke, odnosno rijetki oblak točaka dodane su orijentacijske i kontrolne točke prikupljene na terenu. Koordinate dodanih točaka su bile u istom sustavu kao i koordinate fotografije. Koristeći opciju *Filter Photo by Marker* točke su točnije pozicionirane na označenu lokaciju vidljivu na fotografiji (Slika 28A). Ovisno o načinu izvođenja fotogrametrijskog procesa, klasičan pristup ili načine izravnog georeferenciranja, točke su korištene kao orijentacijske (OT) i kontrolne (CP). U nekim načina obrade sve točke su služile kao OT, dok su u drugim sve služile kao CP (Slika 28B).



Slika 28. (A) Točno pozicioniranje markera na predviđene oznake; (B) primjeri korištenja točaka kao OT-a i CP-a

Nakon dodavanja točaka izvršeno je ažuriranje (engl. *update*) položaja oblaka točaka te ponovna optimizacija položaja kamere i procjena unutarnjih kalibracijskih parametara. U slučajevima gdje su dodane kontrolne točke te je izvršeno ažuriranje rekonstruiranog modela uočeno je da pojedine lokacije kamere (fotografije) imaju značajnu pogrešku pozicioniranja (npr. > 40 cm) izvršeno je brisanje manjeg broja tih fotografija koje su se uglavnom nalazile na rubovima misije. Ostavljanje takvih fotografija moglo bi povećati pogrešku modela. Navedene lokacije kamere (fotografije) su uočene prilikom označavanja točaka (Slika 29) te

uvidom u parametar *Error (m)*, lociran u prozoru *Reference*. Nakon brisanja tih fotografija izvršena je ponovna optimizacija i ažuriranje. Brisanjem tih fotografija došlo je do smanjenja ukupne pogreške pozicioniranja UAV-a.



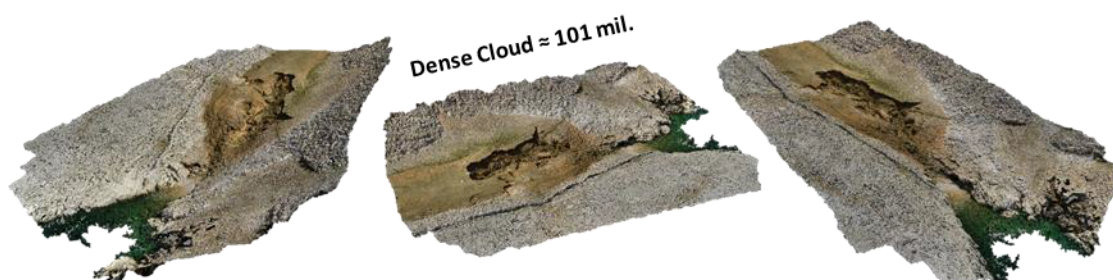
Slika 29. Primjer lokacije kamere (fotografije) lošeg pozicioniranja

4.4.6 Izgradnja gustog oblaka točaka

Generiranje gustog oblaka točaka (engl. *dense point cloud*) predstavlja sljedeći korak obrade snimki. Generirani oblak točaka može imati gotovo veću gustoću od primjene LiDAR (engl. *Light Detection and Ranging*) tehnologije. Također, gusti oblak točaka moguće je klasificirati i uređivati, a primarno služi kao temelj za preostale faze obrade. Parametar kvalitete unutar etape *Dense cloud* označava željenu kvalitetu rekonstrukcije. Postavkom najveće kvalitete postiže se vrlo detaljna i točna geometrija te dugotrajna obrada. Opcija ultra visoke kvalitete (engl. *ultra high quality*) podrazumijeva obradu izvornih fotografija, a svaka sljedeća kvaliteta smanjuje veličinu slike za četiri puta. Parametri *high quality* i *aggressive depth filter*, korišteni su za generiranja gustog oblaka točaka prilikom obrade UAV snimki.

4.4.7 Izvođenje fotogrametrijskih modela

Iz oblaka točaka, koji su imali okvirno oko 101 mil. točaka (Slika 30), izvedeni su digitalni modeli površina (DEM) i digitalni ortofoto snimci (DOF).



Slika 30. Primjer izvedenog gustog oblaka točaka

5. REZULTATI I RASPRAVA

5.1. Orijentacijske (OT) i kontrolne (CP) točke

U Tablicama 7. – 10. su prikazani rezultati mjerenja OT-a i CP-a. Koordinate su prikupljene sa STONEX-om S10 koji u RTK načinu rada ima vodoravnu preciznost od 0,8 cm i vertikalnu od 1,5 cm. Nakon inicijalizacije prijamnika mjerenje svake točke trajalo je 2 min (10 epoha mjerenja). Točke su prikupljanje u projekcijskom koordinatnom sustavu WGS 84 / UTM zone 33N³². Međutim, prilikom korištenja točaka, u obliku OT-a ili CP-a, ovisno o načinu izvođenja modela koordinate su transformirane u WGS84 - World Geodetic System 1984³³.

Tablica 7. Mjerenja točaka OT1A, OT1B i OT1D

	OT1A			OT1B			OT1D		
1	515387,233	4913527,157	65,821	515370,233	4913534,689	62,793	515354,240	4913521,536	57,951
2	515387,230	4913527,159	65,818	515370,232	4913534,687	62,787	515354,240	4913521,538	57,951
3	515387,228	4913527,159	65,816	515370,229	4913534,682	62,782	515354,241	4913521,540	57,950
4	515387,227	4913527,158	65,818	515370,228	4913534,687	62,781	515354,241	4913521,540	57,953
5	515387,231	4913527,160	65,818	515370,226	4913534,687	62,776	515354,243	4913521,543	57,954
6	515387,230	4913527,161	65,825	515370,229	4913534,687	62,783	515354,243	4913521,543	57,954
7	515387,231	4913527,164	65,818	515370,228	4913534,683	62,785	515354,241	4913521,544	57,949
8	515387,230	4913527,159	65,825	515370,227	4913534,683	62,783	515354,242	4913521,542	57,948
9	515387,229	4913527,158	65,820	515370,226	4913534,689	62,775	515354,239	4913521,539	57,952
10	515387,231	4913527,159	65,823	515370,228	4913534,688	62,776	515354,241	4913521,538	57,955
MEAN	515387,23	4913527,16	65,82	515370,23	4913534,69	62,78	515354,24	4913521,54	57,95
RANGE	0,61	0,69	0,90	0,73	0,77	1,80	0,37	0,80	0,7

Tablica 8. Mjerenja točaka OT1E, OT1F i OT1G

	OT1E			OT1F			OT1G		
1	515336,626	4913529,004	55,57	515337,167	4913550,157	55,120	515313,765	4913558,957	48,516
2	515336,624	4913529,005	55,57	515337,167	4913550,157	55,129	515313,762	4913558,954	48,517
3	515336,625	4913529,008	55,57	515337,167	4913550,154	55,121	515313,758	4913558,951	48,515
4	515336,633	4913529,004	55,58	515337,160	4913550,156	55,124	515313,763	4913558,952	48,511
5	515336,630	4913529,006	55,58	515337,171	4913550,152	55,120	515313,763	4913558,956	48,507
6	515336,626	4913529,000	55,57	515337,168	4913550,153	55,120	515313,759	4913558,960	48,511
7	515336,628	4913528,999	55,57	515337,170	4913550,160	55,126	515313,763	4913558,957	48,512
8	515336,624	4913528,999	55,58	515337,170	4913550,157	55,123	515313,763	4913558,959	48,507
9	515336,631	4913528,997	55,58	515337,172	4913550,153	55,125	515313,762	4913558,955	48,506
10	515336,628	4913529,001	55,57	515337,172	4913550,153	55,129	515313,764	4913558,955	48,518
MEAN	515336,63	4913529,00	55,58	515337,17	4913550,16	55,12	515313,76	4913558,96	48,51
RANGE	0,90	1,06	1,00	1,18	0,80	0,90	0,71	0,88	1,2

³² **Unit: metre**; Geodetic CRS: *WGS 84*; Datum: *World Geodetic System 1984*; Ellipsoid: *WGS 84*; Prime meridian: Greenwich; Data source: OGP; Revision date: 1995-06-02

³³ **Unit: degree**; Geodetic CRS: *WGS 84*; Datum: *World Geodetic System 1984*; Ellipsoid: *WGS 84*; Prime meridian: Greenwich; Data source: OGP; Information source: EPSG. Revision date: 2007-08-27

Tablica 9. Mjerenja točaka OT1H, OT1I i OT1J

OT1H				OT1I			OT1J		
1	515303,863	4913548,148	47,308	515307,133	4913551,512	44,385	515299,634	4913528,588	56,043
2	515303,862	4913548,154	47,308	515307,136	4913551,509	44,385	515299,629	4913528,591	56,040
3	515303,857	4913548,156	47,309	515307,136	4913551,508	44,387	515299,633	4913528,594	56,043
4	515303,851	4913548,149	47,311	515307,140	4913551,515	44,384	515299,629	4913528,596	56,039
5	515303,858	4913548,153	47,313	515307,141	4913551,514	44,388	515299,633	4913528,597	56,049
6	515303,855	4913548,152	47,301	515307,140	4913551,513	44,388	515299,635	4913528,596	56,047
7	515303,856	4913548,152	47,305	515307,137	4913551,509	44,383	515299,633	4913528,590	56,043
8	515303,857	4913548,152	47,300	515307,138	4913551,517	44,388	515299,627	4913528,595	56,049
9	515303,854	4913548,150	47,305	515307,131	4913551,512	44,385	515299,625	4913528,595	56,043
10	515303,852	4913548,154	47,303	515307,138	4913551,511	44,383	515299,633	4913528,597	56,047
MEAN	515303,85	4913548,15	47,31	515307,14	4913551,51	44,39	515299,63	4913528,59	56,04
RANGE	1,13	0,74	1,30	1,01	0,91	0,50	0,97	0,91	1,00

Tablica 10. Mjerenja točaka OT1K te prosječan raspon vrijednosti X, Y i Z koordinata

OT1K				OT/CP	X	Y	Z
	515312,365	4913524,308	56,719	OT1A	0,61	0,69	0,90
	515312,363	4913524,306	56,719	OT1B	0,73	0,77	1,80
	515312,365	4913524,308	56,724	OT1D	0,37	0,80	0,7
	515312,368	4913524,310	56,721	OT1E	0,90	1,06	1,00
	515312,364	4913524,306	56,720	OT1F	1,18	0,80	0,90
	515312,361	4913524,308	56,722	OT1G	0,71	0,88	1,2
	515312,364	4913524,304	56,722	OT1H	1,13	0,74	1,30
	515312,362	4913524,304	56,717	OT1I	1,01	0,91	0,50
	515312,368	4913524,306	56,721	OT1J	0,97	0,91	1,00
	515312,365	4913524,311	56,718	OT1K	0,72	0,70	0,70
MEAN	515312,36	4913524,31	56,72	MEAN	0,83	0,83	1,00
RANGE	0,72	0,70	0,70				

Za svaku točku je izračunat raspon XYZ koordinate unutar 10 mjerenja. U Tablici 10 je prikazana srednja vrijednost raspona za XYZ koordinate. Vidljivo je da se preciznost prikupljenih točaka gotovo u potpunosti podudara s navedenom tvorničkom preciznosti GNSS prijarnika. X koordinata u prosjeku odstupa 0,83 cm, Y koordinata isto, a Z koordinata nešto više, 1 cm (Tablica 10).

5.2 Fotogrametrijski modeli - klasičan pristup

U nastavku teksta su prikazani izvedeni fotogrametrijski modeli (DOF, DSM) nastali klasičnim pristupom. Klasičan pristup se u ovom slučaju odnosi na tri dominantna načina izvođenja UAV fotogrametrijskog procesa.

(5.2.1) Sve prikupljene točke su korištene kao OT (n=10);

(5.2.2) Šest prikupljenih točaka korišteno je kao OT, a četiri kao CP;

(5.2.3) Točke nisu korištene u orijentaciji rekonstruiranog, RTK način rada je isključen, primijenjen je samo inicijalni GNSS prijatelj UAV-a.

5.2.1 Klasičan pristup (10 OT)

U ovom načinu snimanja nije korištena mobilna stanica D-RTK 2 te su sve točke korištene u procesu orijentacije modela. Snimljeno područje iznosi 0.0143 km². Prostorna rezolucija DOF-a iznosi 6.62 mm/pix, a DEM 1.32 cm/pix, zbog odabira postavke *Quality: High*. Gustoća točaka iznosi 0.57 točaka/cm². S obzirom da su sve točke korištene kao OT, nije procijenjena točnost modela.

5.2.2 Klasičan pristup (6 OT, 4 CP)

U ovom načinu snimanja nije korištena mobilna stanica D-RTK 2, šest točaka je korišteno u procesu orijentacije modela (OT), a četiri su korištene kao kontrolne (CP). Snimljeno područje, prostorna rezolucija DEM-a i DOF-a te gustoća snimanja je jednaka kao u prethodnom modelu. Točnost modela za X koordinatu iznosi 1,331 cm, za Y 1,282 cm, a za Z 2,757 cm. Ukupna točnost ovog modela iznosi 3,319 cm. Ukupna pogreška izračunava se kao kvadratni korijen iz zbroja kvadrata podijeljen s brojem OT-a.

Tablica 11. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (6 OT, 4 CP)

	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Photos
CP	OT1K	0,001	0,823	-2,814	2,931	38
	OT1D	0,586	-2,004	-1,034	2,330	26
	OT1E	1,477	1,344	2,548	3,237	36
	OT1I	-2,137	0,268	3,864	4,424	66
	TOTAL	1,331	1,282	2,757	3,319	

5.2.3 GNSS prijatelj UAV-a

U ovom načinu snimanja nije korištena mobilna stanica D-RTK 2 za pozicioniranje te nisu korištene orijentacijske točke u procesu fotogrametrijske obrade. U fotogrametrijskom procesu su korištene samo X, Y i Z koordinate fotografija koje su prikupljene inicijalnim GNSS

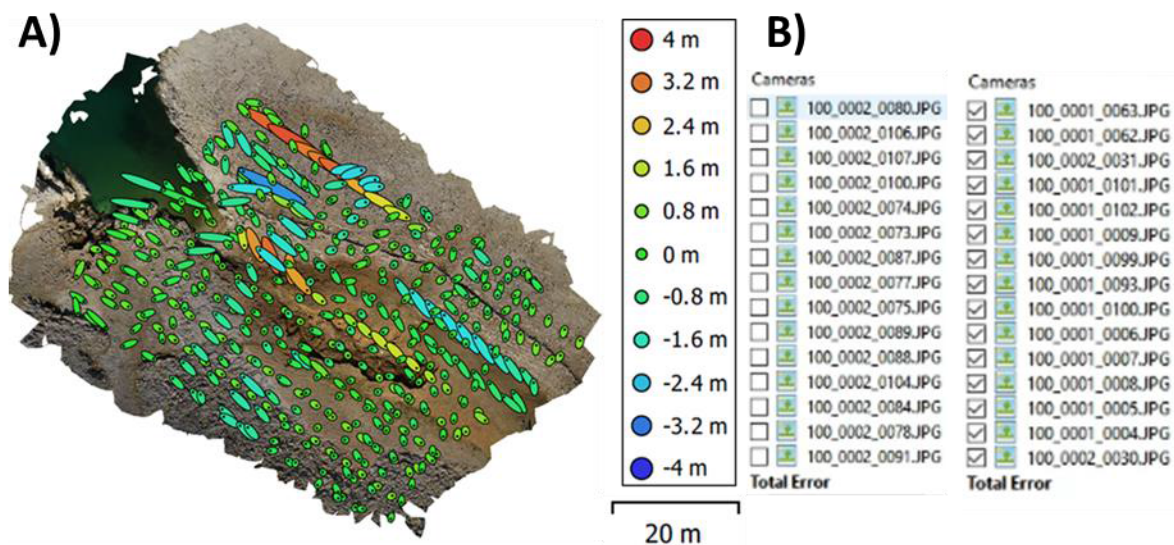
prijamnikom UAV-a. Svih 10 točaka je u ovom slučaju korišteno za provjeru točnosti modela, odnosno sve točke su bile kontrolne. Točnost modela za X koordinatu iznosi 0,755 m, za Y 0,708 m, a za Z 0,938 m. Ukupna točnost ovog modela iznosi 1,397 m (Tablica 12).

Tablica 12. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (GNSS prijamnik - UAV)

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Photos
OT1A	0,699461	0,764778	1,049160	1,47474	26
OT1B	0,742769	0,748229	0,968010	1,43129	33
OT1D	0,760274	0,707987	0,975644	1,42518	47
OT1E	0,783596	0,717048	0,957823	1,43025	48
OT1F	0,763768	0,677607	0,872793	1,34323	48
OT1I	0,745931	0,668559	0,938733	1,37281	89
OT1G	0,751297	0,697362	0,869567	1,34421	74
OT1H	0,757736	0,655615	0,923025	1,36234	84
OT1J	0,775661	0,719683	0,904362	1,39193	45
OT1K	0,764426	0,714199	0,904814	1,38315	44
Total	0,755	0,708	0,938	1,397	

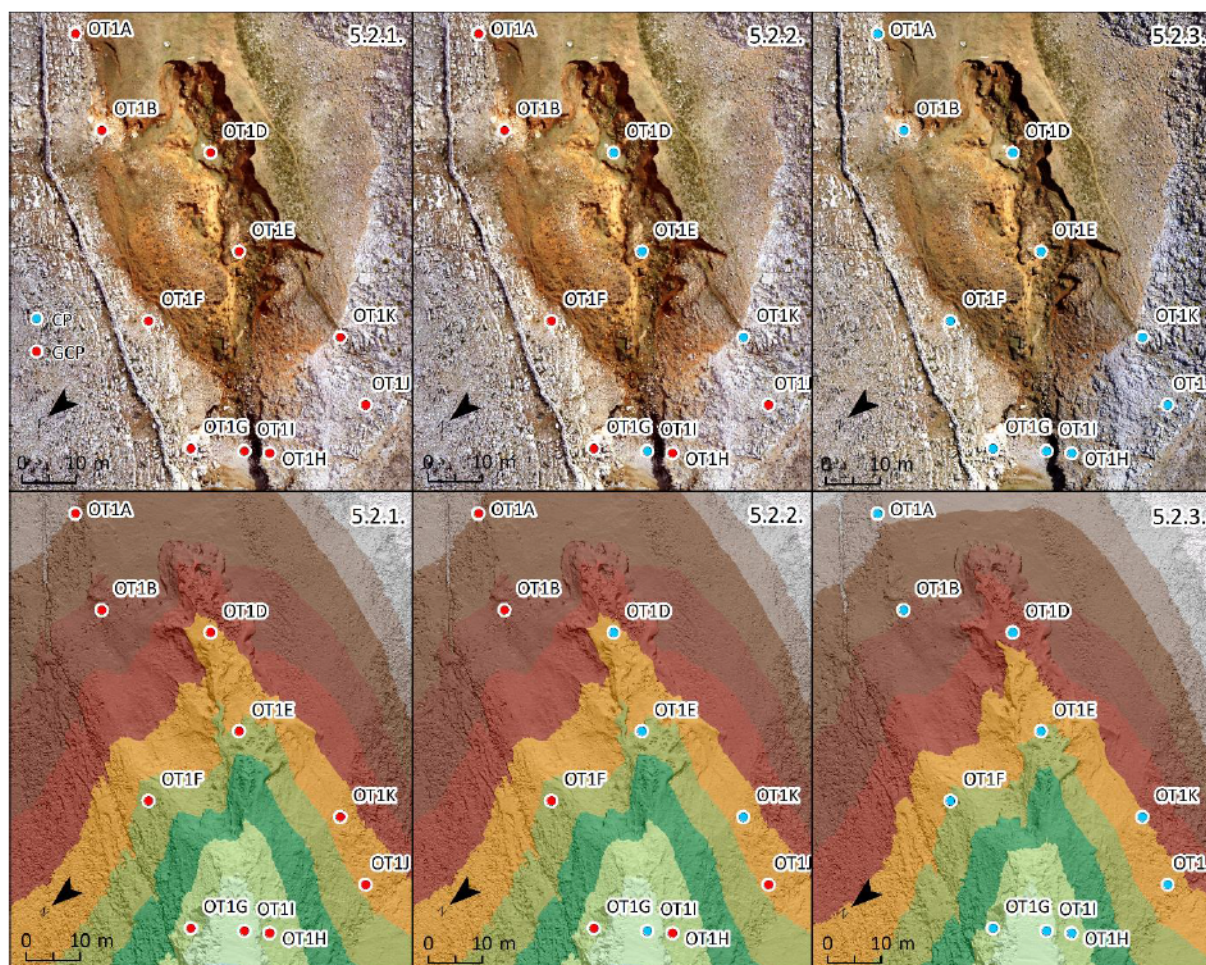
Na slici 31. prikazana je procijenjena pogreška pozicioniranja kamere u izvedenoj misiji. Pogreška u visini (Z) je predstavljena bojom elipse, dok je horizontalna pogreška predstavljena oblikom elipse. Maksimalna pogreška pozicioniranja u jednoj fotografiji (lokaciji kamere) iznosi 4,833 m. Prosječna pogreška pozicioniranja kamere prema X koordinati iznosi 0,576 m, prema Y 0,454 m, a prema Z koordinati 0,852 m. Dakle, horizontalno (X,Y) pozicioniranje kamere u načinu rada gdje se koristi inicijalni GNSS prijamnik unutar UAV iznosi 0,733 m, dok ukupna pogreška pozicioniranja iznosi 1,1236 m. Najveće pogreške pozicioniranja kamere se nalaze na rubovima misija. To nije iznenađujuće s obzirom na to da na završetku profila dolazi do naglog usporavanja UAV-a te zakretanja. Nadalje, u tom trenutku UAV je najpodložniji utjecaju vjetru, koji je za vrijeme snimanja bio umjeren. Ipak, s obzirom da su u procesu orijentacije modela korišteni samo XYZ podatci fotografija prikupljeni s GNSS prijamnikom UAV-a, može se zaključiti da je razina točnosti pozicioniranja zadovoljavajuća.

U prethodna dva načina rada, klasičnom pristupu gdje je korišteno 10 OT-a te klasičnom pristupu gdje je korišteno 6 OT-a i 4 CP-a, pogreška pozicioniranja kamere nije izračunata unutar izvješća zato što su prilikom orijentacije modela korištene samo orijentacijske točke, dok su XYZ koordinate fotografija GNSS prijamnikom UAV-a bile isključene (Slika 31B). S time se nastojala dobiti što veća točnost referentnog modela. Navedeno se savjetuje u velikom broju uputa namijenjenih za izvođenje fotogrametrijskih procesa u *Agisoftu*.



Slika 31. (A) Procijenjena pogreška pozicioniranja kamera; (B) (ne)korištenje XYZ koordinata fotografija u orijentaciji modela

Na slici 32. prikazani su digitalni modeli površina (DEM) i digitalni ortofoto snimci (DOF) za uže područje jaruge Santiš izvedeni u ova tri procesa.



Slika 32. DOF-ovi i DEM-ovi izvedeni klasičnim pristupima (5.2.1., 5.2.2, i 5.2.3)

5.3 Izravno georeferenciranje - modeli

U nastavku teksta su prikazani izvedeni aerofotogrametrijski modeli (DOF, DSM) nastali izravnim georeferenciranjem. Slijedeći prezentirane moguće načine izvođenja RTK pozicioniranja testirano je nekoliko fotogrametrijskih procesa.

(5.3.1) D-RTK 2 - BAZNA STANICA

D-RTK 2 - BAZNA STANICA s manjim brojem OT-a

(5.3.2) D-RTK 2 - korekcija sa STONEXOM S10

(5.3.3) Mrežne NTRIP korekcije - CROPOS

U prvom od tri načina izvođenja izravnog georeferenciranja napravljena je kombinacija u kojoj je dodan manji broj ($n=3$) orijentacijskih točaka (OT) s ciljem promatranja utjecaja manjeg broja OT-a na točnost modela izvedenog izravnim georeferenciranjem.

5.3.1 D-RTK 2 - bazna stanica

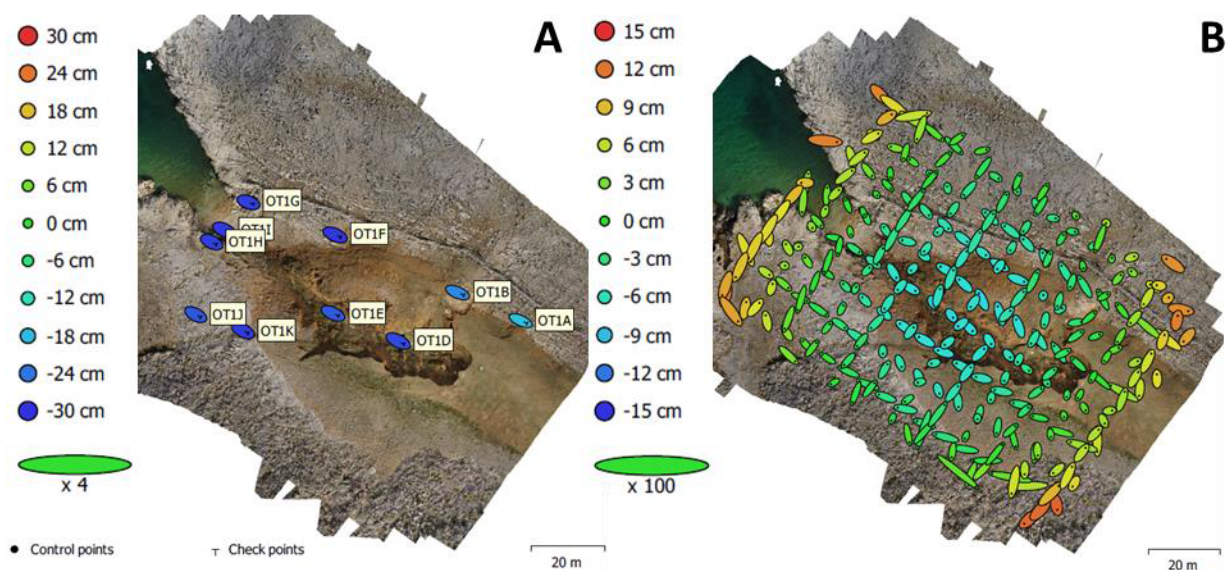
U ovom načinu izravnog georeferenciranja korištena je samo mobilna stanica D-RTK 2 za pozicioniranje UAV-a. Sve prikupljene točke su korištene kao CP u procesu fotogrametrijske obrade ($n=10$). Pogreška modela za X koordinatu iznosi 75,899 cm, za Y 34,985 cm, a za Z 26,940 cm. Ukupna pogreška iznosi 87,809 cm.

Tablica 13. Točnost modela izvedenog izravnim georeferenciranjem (D-RTK2 - bazna stanica)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Photos
OT1E	78,8414	-35,9891	-26,5014	90,6283	38
OT1D	82,407	-41,3429	-27,8488	96,3105	30
OT1I	66,1333	-29,4838	-29,1895	78,0700	71
OT1B	86,7105	-35,7216	-22,5157	96,4454	25
OT1F	78,3876	-34,1824	-29,6208	90,5011	38
OT1J	68,3562	-36,0685	-26,7492	81,7865	33
OT1H	66,2145	-32,1334	-28,7381	79,0114	58
OT1K	71,0721	-37,7469	-29,2908	85,6389	32
OT1A	87,2655	-38,2664	-17,7538	96,9267	15
OT1G	69,5663	-26,4258	-28,7884	79,7908	55
Total	75,899	34,985	26,940	87,809	

Ovako velika ukupna pogreška modela nije iznenađujuća ako se promotre razlike u koordinatama lokacije mobilne stanice koju je D-RTK 2 sama očitala te onima koje su očitane STONEX-om S10 (Slika 33). Odstupanje u lokaciji D-RTK 2 utjecalo je na ovoliku pogrešku (Slika 33A).

Nakon iterativnog procesa gradualne selekcije i brisanja fotografija koje su se nalazile na rubovima misije te imale relativnu pogrešku pozicioniranja >20 cm, maksimalna pogreška pozicioniranja u jednoj fotografiji (lokaciji kamere) svedena je svega na 13,3 cm. Prosječna pogreška pozicioniranja kamere prema X koordinati iznosi tek 2,603 cm, prema Y 2,847 cm, a prema Z koordinati 5,0838 cm. Dakle, horizontalno (X,Y) pozicioniranje kamere u RTK pozicioniranju gdje se koristi samo D-RTK 2 iznosi 3,858 cm, dok ukupna pogreška pozicioniranja iznosi 6,382 cm (Slika 33B). Naravno, apsolutna pogreška pozicioniranja će biti poznata tek u primjeru dolje (Slika 34) kada se u rekonstruirani model doda manji broj orijentacijskih točaka. Slično kao i u klasičnom pristupu gdje je za pozicioniranje korišten samo interni GNSS prijamnik UAV-a (5.2.3), najveće pogreške pozicioniranja se nalaze na rubovima misija. To nije iznenađujuće s obzirom na to da na završetku profila dolazi do naglog usporavanja te zakretanja UAV-a. Nadalje, u tom trenutku UAV je najpodložniji utjecaju vjetrova koji je za vrijeme snimanja bio umjeren (3-5 m/s). Dakle, relativna točnost pozicioniranja je u ovom načinu rada centimetarska, ali je ukupna pogreška modela izrazito velika (87,809 cm) zbog netočnog mjerenja lokacije D-RTK 2 (Slika 16).



Slika 33. (A) Lokacija i pogreške OT-a; (B) procijenjene pogreške pozicioniranja kamere

U rekonstruirani model izveden izravnim georeferenciranjem koristeći D-RTK 2 dodan je manji broj OT-a s ciljem utvrđivanja utjecaja na točnost modela. Izvršena je iterativna procjena točnosti modela, prvo s jednom, pa dvije te u konačnici s tri orijentacijske točke (OT). Dakle, u 1. scenariju korišteno je devet, u 2. osam, a u 3. sedam kontrolnih točaka (CP).

U 1. scenariju pogreška modela za X koordinatu iznosi 20,37 cm, za Y 11,68 cm, a za Z 31,99 cm. Ukupna pogreška iznosi 39,68 cm. U 2. scenariju pogreška modela za X koordinatu

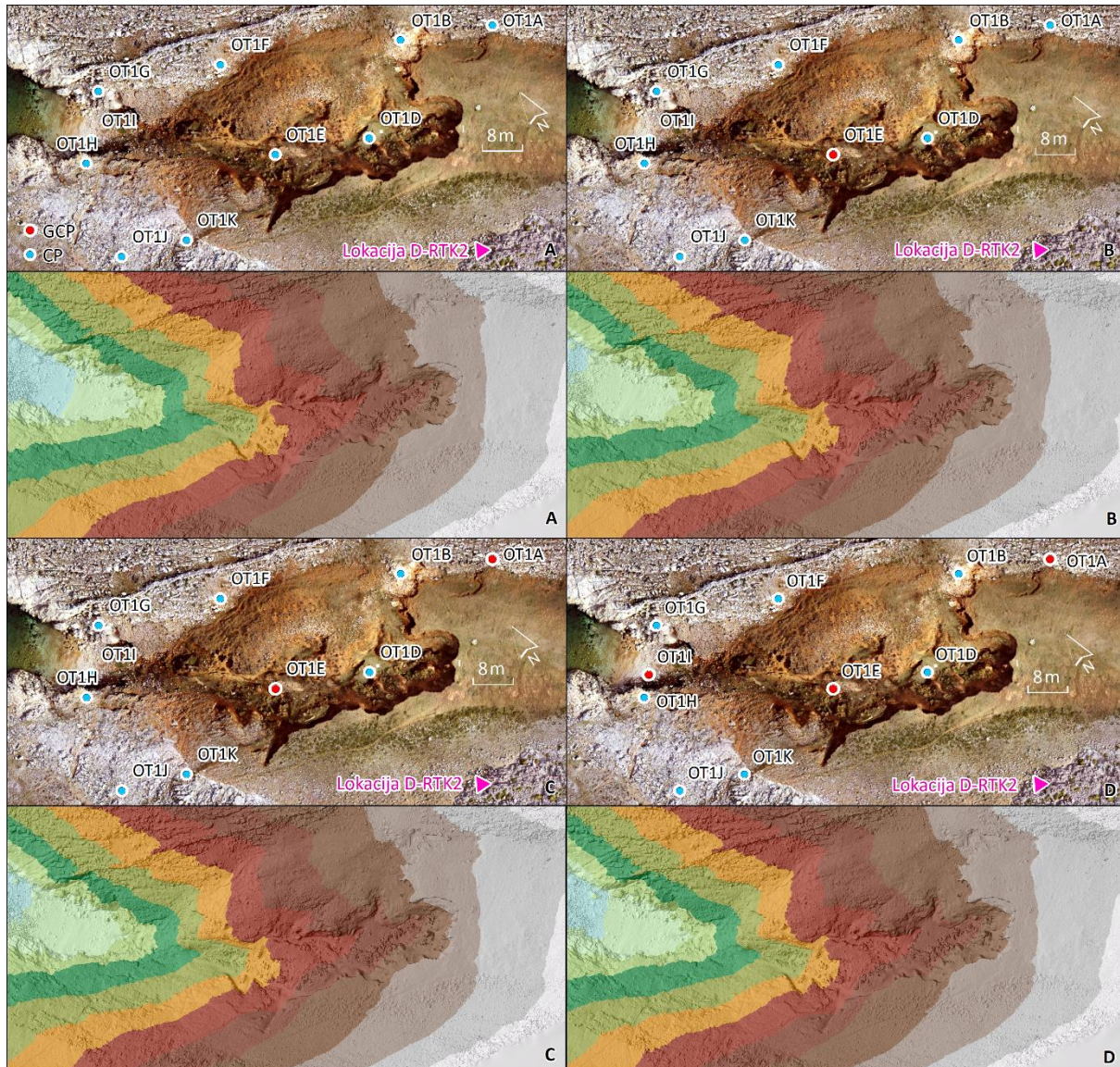
iznosi 21,57 cm, za Y 9,36 cm, a za Z 23,05 cm. Ukupna pogreška iznosi 32,93 cm. U 3. scenariju pogreška modela za X koordinatu iznosi 15,10 cm, za Y 7,36 cm, a za Z 9,08 cm. Ukupna pogreška iznosi 19,09 cm.

Tablica 14. Točnost različitih scenarija snimanja (D-RTK + OT)

	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Photos
D-RTK2+1OT 1. SCENARIJ	OT1D	23,34	-16,94	-23,13	36,97	30
	OT1I	4,16	-0,06	39,26	39,48	71
	OT1B	31,48	-16,14	-32,04	47,72	25
	OT1F	21,63	-10,82	2,77	24,34	38
	OT1J	15,24	-6,87	30,55	34,83	33
	OT1H	6,89	-2,90	38,95	39,66	58
	OT1K	16,48	-9,41	14,92	24,14	32
	OT1A	32,26	-20,48	-48,53	61,77	15
	OT1G	10,96	0,05	32,79	34,57	55
	Total	20,37	11,68	31,99	39,68	
D-RTK2+2OT 2. SCENARIJ	OT1D	18,82	-6,17	-5,37	20,52	30
	OT1I	17,53	-8,29	35,74	40,66	71
	OT1B	15,65	-7,41	-5,14	18,06	25
	OT1F	19,39	-13,66	13,03	27,06	38
	OT1J	30,24	-9,02	21,01	37,91	33
	OT1H	20,68	-10,79	33,38	40,72	58
	OT1K	27,38	-7,60	11,13	30,52	32
	OT1G	18,66	-9,87	32,69	38,91	55
		Total	21,57	9,36	23,05	32,93
D-RTK2+3OT 3. SCENARIJ	OT1D	17,00	-7,53	-14,41	23,52	30
	OT1B	16,39	-5,78	-10,98	20,56	25
	OT1F	14,94	-9,39	-3,29	17,95	38
	OT1J	17,83	-8,38	5,69	20,50	33
	OT1H	9,71	-7,20	10,26	15,85	58
	OT1K	17,42	-7,91	-2,65	19,32	32
	OT1G	9,93	-3,98	9,67	14,42	55
		Total	15,10	7,36	9,08	19,09

Iz izvedenih podataka može se uočiti da ukupna pogreška modela dodavanjem orijentacijskih točaka opada. Dodavanjem samo jedne orijentacijske točke ukupna pogreška modela se smanjila za 48,129 cm. Druga orijentacijska točka je smanjila pogrešku za 6,75 cm, a treća za 13,84 cm. Ukupna pogreška modela je dodavanjem samo tri orijentacijske točke smanjena za 68,719 cm. Naravno, prilikom naknadne orijentacije modela uz orijentacijske točke su korištene i XYZ koordinate fotografija čija je apsolutna točnost uvjetovana točnošću

lokacije D-RTK 2. Na slici 34. prikazani su DOF-ovi i DEM-ovi izvedeni koristeći (A) D-RTK; (B) D-RTK+1OT; (C) D-RTK+2OT; (D) D-RTK+3OT.



Slika 34. Izvedeni DOF-ovi i DEM-ovi

(A) D-RTK; (B) D-RTK+1OT; (C) D-RTK+2OT; (D) D-RTK+3OT.

5.3.2 D-RTK 2 - korekcija STONEX S10

U ovom načinu izravnog georeferenciranja korišten je GNSS prijammnik *STONEX S10* pomoću kojeg su izmjerene točne koordinate lokacije na kojoj je montirana mobilna stanica *D-RTK 2*. U *DJI Pilot* aplikaciju, pod *RTK* pozicioniranje unesene su izmjerene koordinate koje predstavljaju fazno središte antene (APC) *D-RTK 2*. Sve prikupljene točke su korištene kao kontrolne ($n=10$) u procesu fotogrametrijske obrade. Točnost modela za X koordinatu iznosi 4,09 cm, za Y 2,69 cm, a za Z 5,97 cm. Ukupna pogreška ovog modela iznosi 7,72 cm.

Najveću ukupnu pogrešku imaju točke OT1A i OT1B koje se nalaze na najmanjem broju fotografija. Ako bi se ove dvije točke isključile iz analize ukupna pogreška modela izvedenog izravnim georeferenciranjem koristeći mrežnu NTRIP korekciju bi iznosila 5,99 cm.

Tablica 15. Točnost načina snimanja D-RTK2 korekcija STONEX S10

	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Photos
OT1D	3,99	-3,15	5,24	7,30	33,00
OT1I	-4,52	4,00	0,44	6,05	62,00
OT1A	6,23	-1,18	11,85	13,44	16,00
OT1E	3,00	1,20	6,82	7,55	39,00
OT1B	6,82	0,71	10,23	12,32	26,00
OT1F	2,37	-0,10	3,10	3,90	42,00
OT1K	-1,38	-0,14	2,34	2,72	34,00
OT1J	-2,12	1,07	4,42	5,02	30,00
OT1H	-4,13	1,96	0,92	4,67	52,00
OT1G	-2,67	6,18	1,26	6,85	53,00
Total	4,09	2,69	5,97	7,72	

Nakon iterativnog procesa gradualne selekcije i brisanja fotografija koje su se nalazile na rubovima misije te imale relativnu pogrešku pozicioniranja >20 cm, maksimalna pogreška pozicioniranja u jednoj fotografiji (lokaciji kamere) svedena je svega na 13 cm. Ukupna pogreška pozicioniranja je centimetarska. Slično kao u prethodnim slučajevima najveće pogreške pozicioniranja se nalaze na rubovima misija.

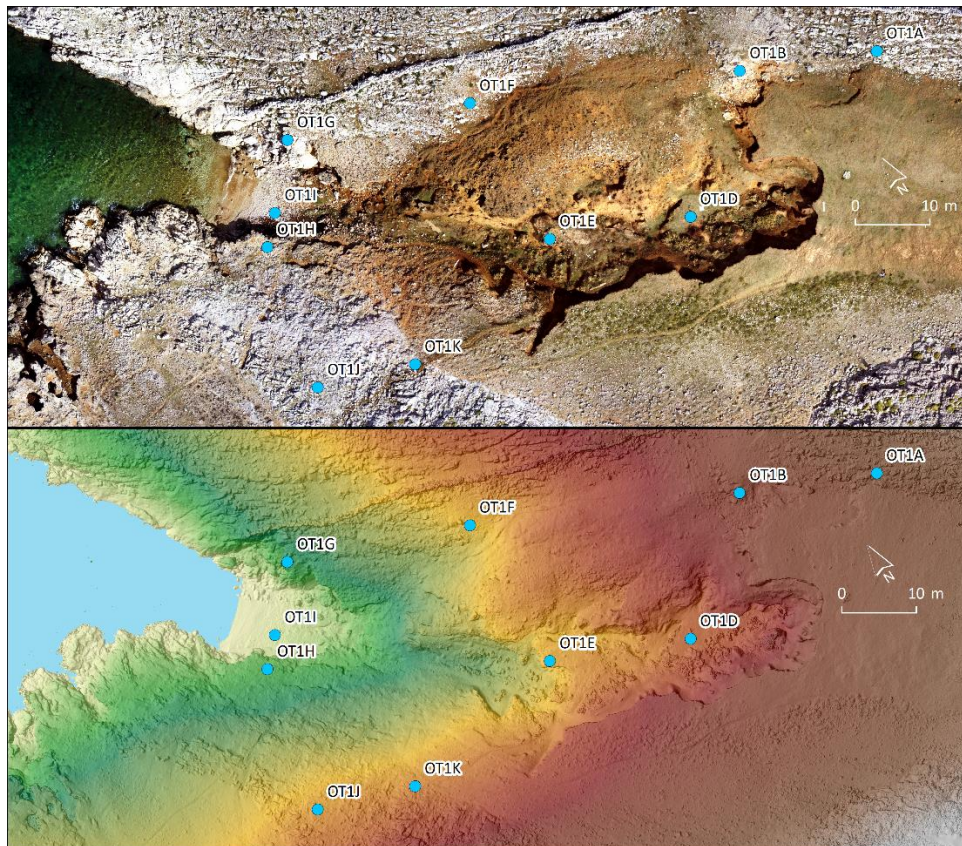
5.3.3 Mrežne NTRIP korekcije - CROPOS

U ovom načinu snimanja korištena je opcija NTRIP spajanja bez bazne stanice daje RTK podatke u stvarnom vremenu. Sve prikupljene točke su korištene kao kontrolne (n=10) u procesu fotogrametrijske obrade. Točnost modela za X koordinatu iznosi 4,044 cm, za Y 2,228 cm, a za Z 4,488 cm. Ukupna pogreška ovog modela iznosi 6,439 cm.

Tablica 16. Točnost načina snimanja mrežna NTRIP korekcija - CROPOS

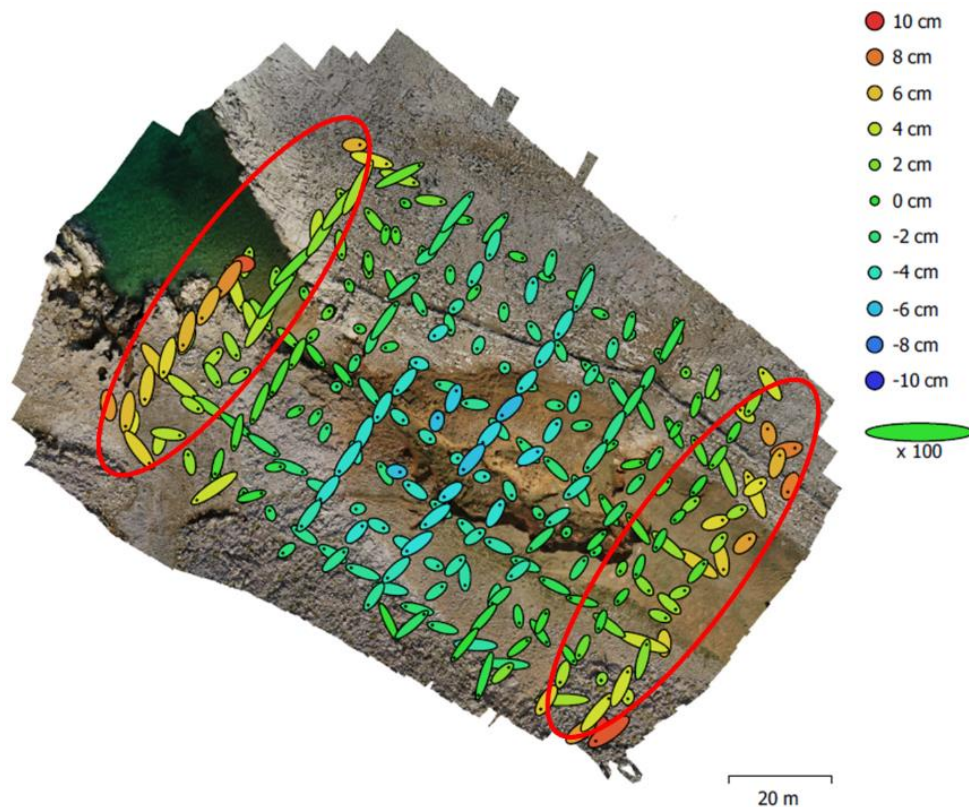
	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Photos
CP	OT1A	4,130	-1,525	9,429	10,407	15
	OT1B	4,423	0,550	7,790	8,975	25
	OT1D	1,612	-3,380	3,519	5,139	30
	OT1E	0,596	0,816	5,487	5,579	39
	OT1F	-0,139	-0,751	1,189	1,413	39
	OT1K	-3,487	-0,543	0,744	3,606	33
	OT1I	-6,387	2,699	-0,306	6,940	66
	OT1G	-4,450	5,046	0,331	6,736	54
	OT1H	-5,955	1,009	0,087	6,041	58
	OT1J	-3,964	0,555	2,674	4,813	31
		TOTAL	4,044	2,228	4,488	6,439

Najveću ukupnu pogrešku imaju točke OT1A i OT1B (Slika 35) koje se nalaze na najmanjem broju fotografija (15 i 25). Ako bi se ove dvije točke isključile iz analize ukupna pogreška modela izvedenog izravnim georeferenciranjem koristeći mrežnu NTRIP korekciju bi iznosila 5,311 cm.



Slika 35. Izvedeni DOF i DEM (NTRIP spajanje - CROPOS)

Nakon iterativnog procesa gradualne selekcije i brisanja fotografija koje su se nalazile na rubovima misije te imale relativnu pogrešku pozicioniranja >20 cm, maksimalna pogreška pozicioniranja u jednoj fotografiji (lokaciji kamere) svedena je svega na 10,1 cm. Prosječna pogreška pozicioniranja kamere prema X koordinati iznosi tek 2,644 cm, prema Y 3,102 cm, a prema Z koordinati 3,281 cm. Dakle, horizontalno (X,Y) pozicioniranje kamere u RTK pozicioniranju gdje se koristi CROPOS iznosi 4,076 cm, dok ukupna pogreška pozicioniranja iznosi 3,232 cm (Slika 36). Slično kao u prethodnim slučajevima najveće pogreške pozicioniranja se nalaze na rubovima misija.



Slika 36. Procijenjene pogreške pozicioniranja kamere

5.4 Apsolutna točnost testiranih načina RTK pozicioniranja

Prije analize točnosti izravnog georeferenciranja kojeg pruža sustav Matrice 210 RTK V2 i D-RTK 2, potrebno je istaknuti nekoliko činjenica. Službene specifikacije koje se mogu pronaći za velik broj sustava senzora testirane su u okolnostima najboljih uvjeta (engl. *best case scenario*). Nadalje, metodologija tih provjera često nije dostupna krajnjim korisnicima. U ovoj studiji slučaja testiranje nije izvršeno u okolnostima najboljih mogućih uvjeta baš iz razloga što takvi uvjeti, osobito u slučaju kad se zahtjeva primjena izravnog georeferenciranja, nisu uvijek mogući. Dakle, općenito je bio cilj utvrditi odgovara li ovaj sustav senzora tvrdnjama samog proizvođača u uvjetima (lagan vjetar, vertikalno raščlanjen teren) koji nisu idealni.

U ovoj studiji slučaja je utvrđeno je da točnost izravnog georeferenciranja koristeći *Matrice 210 RTK V2* i mobilnu stanicu *D-RTK 2* ovisi o odabranom načinu rada (engl. *mode*). U radu su testirana tri načina rada izravnog georeferenciranja kroz opciju *RTK* pozicioniranja. U Tablici 17. prikazani su sumarni rezultati XYZ i ukupne pogreške za izvedene modele testiranih pristupa. Centimetarska razina točnosti ostvarena je u načinu rada gdje je korištena opcija *NTRIP* spajanja (*CROPOS*) koja omogućuje pozicioniranje UAV-a u realnom vremenu

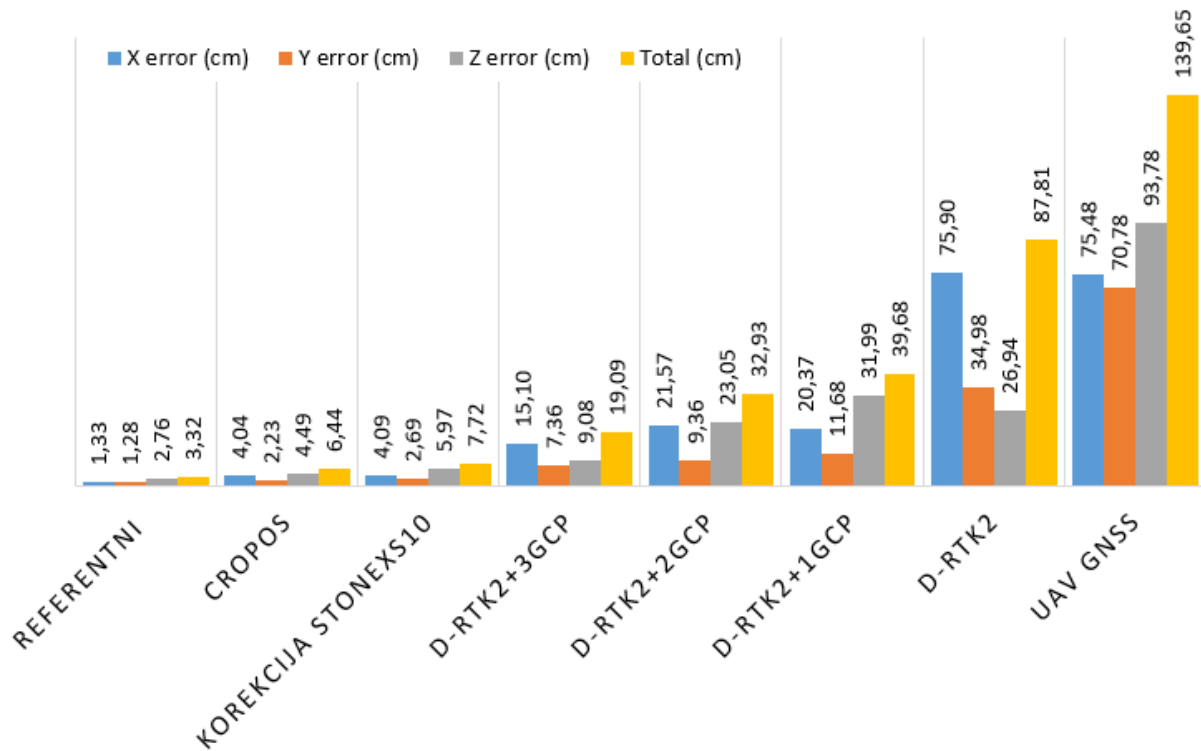
te u načinu rada gdje su korištene korektivne koordinate prikupljene STONEX S10 prijamnikom. Navedene dvije metode daju slične rezultate što je očekivano s obzirom da STONEX S10 koristi CROPOS sustav baznih stanica. Prednost prve metode je ta što korištenje mrežnog tijeka rada zahtijeva najmanju količinu fizičke opreme na lokaciji snimanja. Najveći nedostatak je potreba za aktivnom, pouzdanom internetskom vezom. U drugoj metodi potreban je još jedan visoko precizni GNSS prijamnik koji bi mogao izmjeriti koordinatu na kojoj je montirana D-RTK 2 mobilna stanica.

Tablica 17. Sumarni podatci o točnosti svih testiranih načina RTK pozicioniranja

	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)
REFERENTNI (4 CP)	1,33	1,28	2,76	3,32
CROPOS (10 CP)	4,04	2,23	4,49	6,44
KOREKCIJA STONEXS10 (10 CP)	4,06	2,69	5,97	7,72
D-RTK2+3OT (7 CP)	15,10	7,36	9,08	19,09
D-RTK2+2OT (8 CP)	21,57	9,36	23,05	32,93
D-RTK2+1OT (9 CP)	20,37	11,68	31,99	39,68
D-RTK2 (10 CP)	75,90	34,98	26,94	87,81
UAV GNSS (10 CP)	75,48	70,78	93,78	139,65

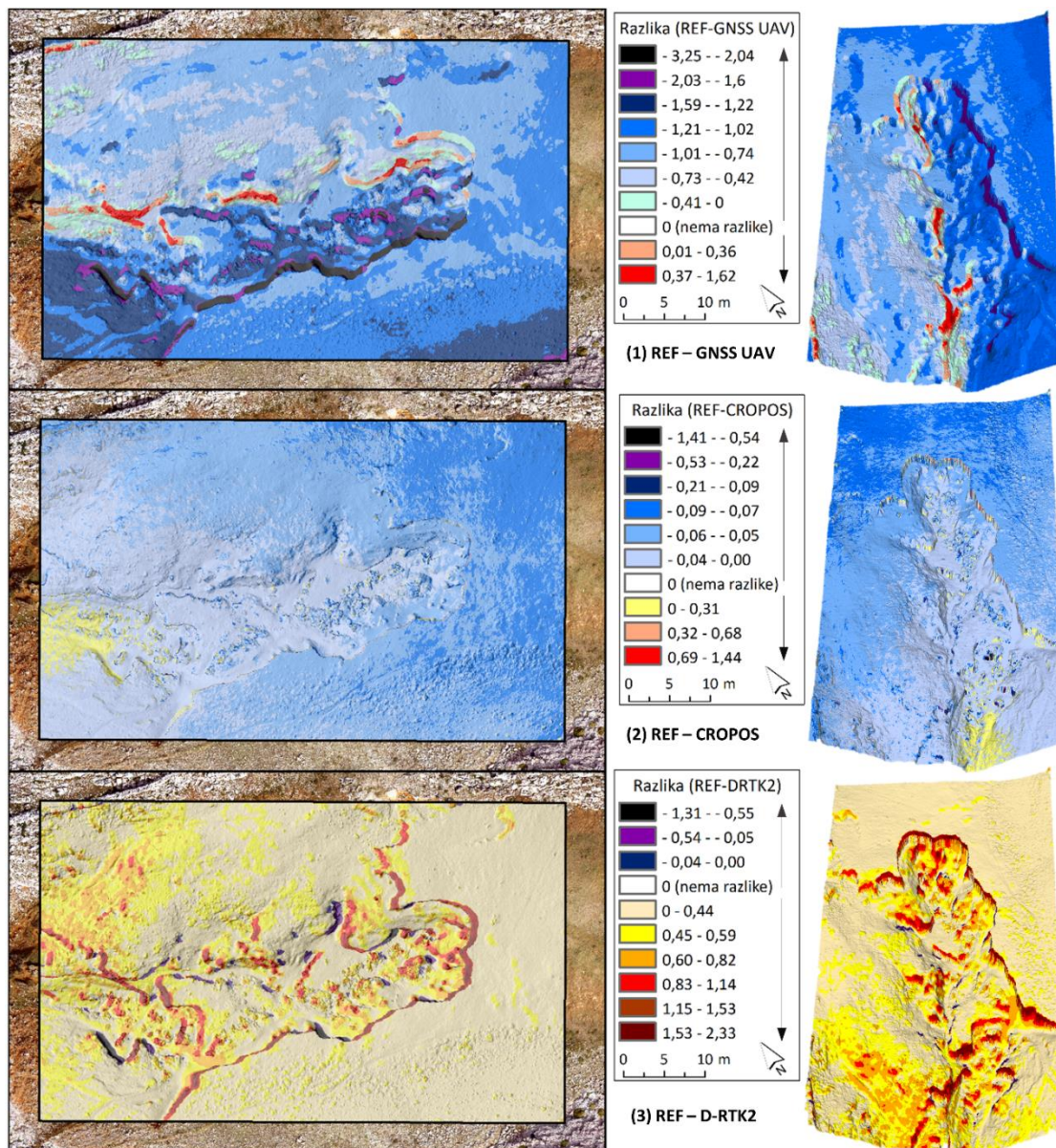
Velika ukupna pogreška modela nije iznenađujuća ako se promotre razlike u koordinatama lokacije mobilne stanice koju je D-RTK 2 sama očitala te onima koje su očitane STONEX-om S10 (Slika 16). Odstupanje u lokaciji D-RTK 2 utjecalo je na ovoliku pogrešku (Slika 37). Nadalje, Buonanno (2019) u uputama za rad s D-RTK 2 navodi „da D-RTK 2 ne može izračunati u realnom vremenu vlastitu lokaciju u centimetarskoj točnosti; već da izračunava prosječnu poziciju s točnošću od 1,5 m“. Naime, u službenim specifikacijama se navodi da je točnost RTK pozicioniranja centimetarska (horizontalno = 1 cm, vertikalno = 2 cm). To znači da će, u idealnim uvjetima snimanja (izostanak vjetera), relativna točnost pozicioniranja kamera (lokacija fotografija) biti centimetarska. Navedeno, potvrđuju rezultati prezentirani u 5.3.1 poglavlju (Slika 33). Naravno, da je kroz gradualnu selekciju i uklanjanje dodatnih fotografija na rubovima misija ta pogreška mogla biti još manja. Međutim, *single point* točnost iznosi horizontalno 1.5 m, a vertikalno 3 m. Stoga, ovakav rezultat nije iznenađujući. Uključivanjem manjeg broja orijentacijskih točaka (n=3) dolazi do značajnog smanjenja pogreške modela (87,81 cm - 19,09 cm). Međutim, konačna ukupna pogreška je i dalje prevelika (19,09 cm) da bi opravdala korištenje XYZ koordinata fotografija u orijentaciji modela. Na temelju ovog studija slučaja može se zaključiti da, mobilna stanica D-RTK 2 zadrži ovakvu razinu točnosti očitavanja vlastite lokacije (≈ 1 m), ipak se ne isplati koristiti manji broja OT-a u orijentaciji modela, jer bi u konačnici, da bi se dobila zadovoljavajuća točnost,

njih trebalo dodati veći broj (> 3), što bi samu primjenu D-RTK 2 činilo besmislenom ako se radi o manjim prostorima.



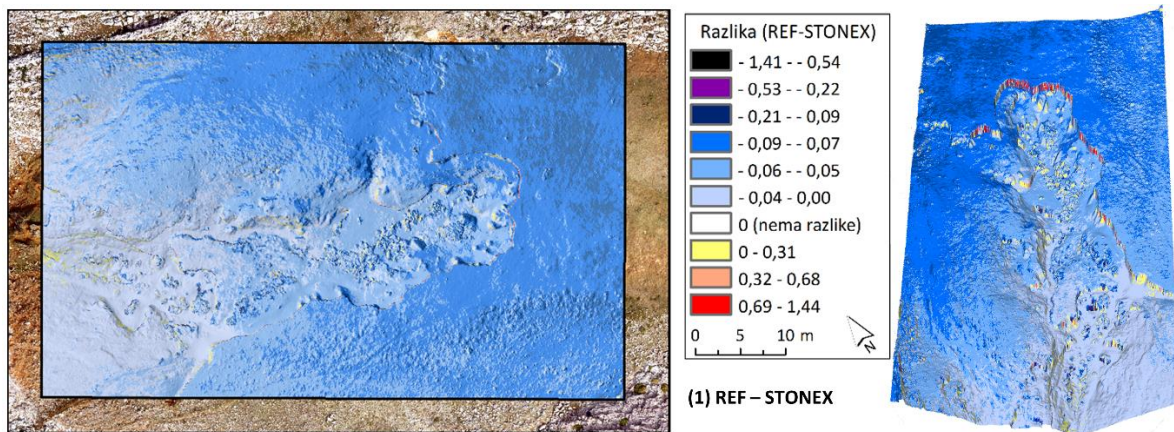
Slika 37. Usporedba XYZ pogreške kroz različite načine snimanja

Unutar manjeg, središnjeg, izrazito vertikalno raščlanjenog dijela jaruge Santiš testirane su visinske razlike između digitalnih modela površina izvedenih izravnim georeferenciranjem te referentnog modela (OT=6). Naime, iako Tablica 17. daje odgovarajuće informacije o Z pogrešci, navedeni podatak se odnosi na specifične XY lokacije (točku), što onemogućuje uvid u kontinuirane visinske razlike u odnosu na vertikalnu raščlanjenost terena. Na slici 38. prikazane su visinske razlike između referentnog modela (6 OT) te modela izvedenog GNSS-UAV, CROPOS sustavom pozicioniranja, STONEX S10 korekcijom i D-RTK 2 modelom.



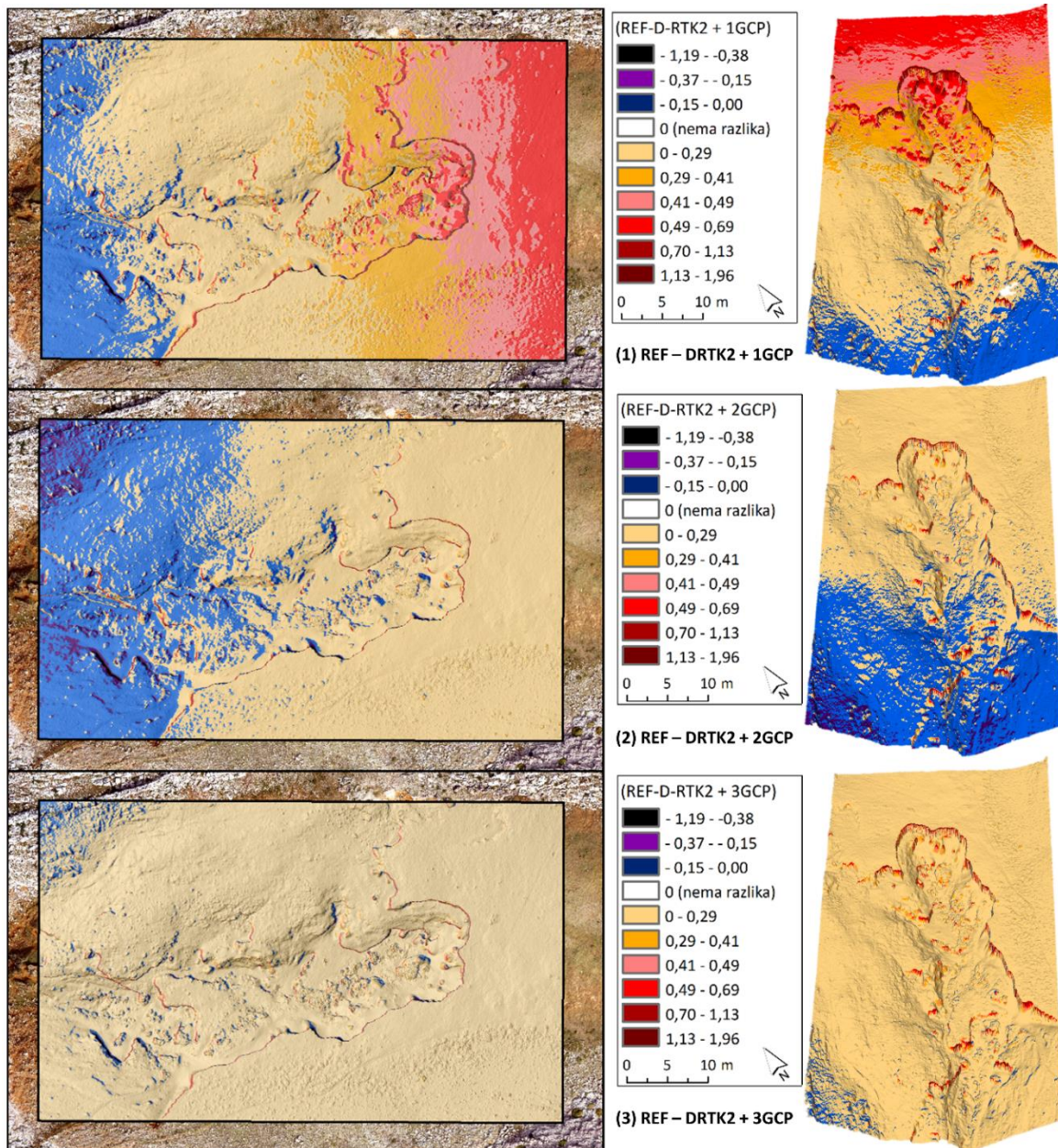
Slika 38. (1) Visinske razlike između referentnog modela i UAV GNSS, (2) CROPOS-a te DRTK-2

Očekivano najveće visinske razlike u odnosu na referentni model ima model izveden GNSS UAV pristupom. Na većem dijelu izdvojene površine GNSS UAV model podcjenjuje visinu, odnosno procijenjene visine su dominantno niže od visina u referentnom modelu. Najveće pogreške, pozitivne i negativne se očekivano nalaze na strmim, rubnim stranama jaruge. Na slici 39. prikazane su visinske razlike između referentnog modela te modela izvedenog koristeći korekciju sa Stonexom S10. Vrijednost odstupanja i distribucija su slične modelu izvedenog s CROPOS-om. Najveće visinske razlike se ponovno nalaze na vertikalno najračlanjenijim dijelovima terena (čelo jaruge).



Slika 39. Visinske razlike između referentnog modela i modela izvedenog sa STONEX S10 korekcijom

Na slici 40. prikazane su visinske razlike između referentnog modela te modela izvedenog koristeći D-RTK 2 baznu stanicu s pristupom u kojem su dodane orijentacijske točke ($n=3$). Može se uočiti kako s dodavanjem orijentacijskih točaka dolazi do opadanja visinskih razlika u odnosu na referentni model. Nadalje, lokacija na koju se dodaje orijentacijska točka utječe na distribuciju visinskih pogrešaka u modeli. Naime, u prvom modelu (DRTK 2 – 1OT) dodana je orijentacijska točka OT1E koja se nalazi gotovo u sredini manjeg pravokutnog izdvojenog područja (Slika 34), utjecala je na smanjenje visinskih razlika u prostoru oko nje (Slika 40₁). Potom je dodavanje druge točke (OT1A) koja se nalazi izvan izdvojenog područja, ali neposredno iznad desnog kuta pravokutnika utjecala na smanjenje visinskih razlika u prostoru oko nje zahvaćajući gotovo cijelu desnu polovicu pravokutnika (Slika 40₂). U konačnici je dodana točka OT1I (Slika 34), koja se nalazi u samom dnu jaruge, utjecala je na smanjenje visinskih razlika u donjem dijelu odabranog područja (Slika 40₃).



Slika 40. Visinske razlike između referentnog modela i DRTK-2 modela s dodanim orijentacijskim točkama

5.5 Relativna točnost modela izvedenih izravnim georeferenciranjem

U Tablici 18. navedeni su rezultati površina za postavljene pločice i laminare unutar jaruge za svih sedam scenarija fotogrametrijske obrade. Za svaki od scenarija izračunata je apsolutna i postotna pogreška u izračunu površine postavljenih objekata. S ciljem što jednostavnije usporedbe testiranih scenarija izračunata je metrika ukupne pogreške (engl. *total error*) koristeći formulu koju Agisoft Metashape koristi u svojim izvješćima te postotna pogreška (PE). Najmanje, gotovo identično odstupanje u površini pločica i laminata u odnosu

na referentne (točne) vrijednosti imaju scenariji snimanja (7) STONEX S10 korekcija, (6) mrežne NTRIP korekcije - CROPOS te (2) D-RTK 2. Najveće odstupanje ima scenarij (1) u kojem je u procesu orijentacije korišten samo inicijalni GNSS prijammnik UAV-a. Navedeni rezultati nisu iznenađujući s obzirom da scenariji snimanja (7) i (6) imaju i najmanju apsolutnu pogrešku, odnosno najbolju točnost u izmjerenim orijentacijskim točkama. Suprotno, iako prema načinu provjere D-RTK 2 ima decimetarsku točnost (Slika 37), relativna točnost mu je u razini scenarija snimanja s korekcijom STONEX-a (7) i mrežnim NTRIP korekcijama (6). Navedeno, ne treba začuditi s obzirom da se D-RTK 2 reklamira kao mobilna stanica koja *generate centimeter-level positioning data for improved relative accuracy* (URL 21). Potrebno je istaknuti da iako dodavanje manjeg broja OT-a značajno smanjuje apsolutnu pogrešku u testiranim kontrolnim točkama, isti učinak ne postoji za relativnu točnost. Sva tri scenarija (3, 4 i 5) su po odstupanjima bliži scenariju u kojem je korišten inicijalni GNSS prijammnik UAV-a. Navedenome može biti razlog (samo) djelomična prilagodba modela koja se događa prilikom dodavanja manjeg broja točaka u rekonstruirani model. Naime, u procesu ažuriranja i optimizacije i dalje se, uz koordinate dodanih OT-ova (1-3), koriste i XYZ koordinate fotografija, koje ipak značajno odstupaju od OT-a.

Tablica 18. Usporedba površine postavljenih objekata

		POVRŠINA (m ²)				
		Laminat1	Laminat2	Pločica1	Pločica2	
	Ref. vrijednost	0,2600	0,2080	0,3600	0,1800	
1	UAV GNSS	0,2559	0,1857	0,3542	0,1687	
2	DRTK2	0,2556	0,1917	0,3597	0,1759	
3	DRTK2 OT1	0,2507	0,1882	0,3561	0,1740	
4	DRTK2 OT2	0,2518	0,1872	0,3595	0,1718	
5	DRTK2 OT3	0,2507	0,1894	0,3552	0,1740	
6	CROPOS	0,2587	0,1903	0,3644	0,1786	
7	STONEX	0,2618	0,1931	0,3568	0,1775	
		ODSTUPANJE (m²)				TOTAL ERROR
1	UAV GNSS	0,0041	0,0223	0,0058	0,0113	0,026
2	DRTK2	0,0044	0,0163	0,0003	0,0041	0,017
3	DRTK2 OT1	0,0093	0,0198	0,0039	0,0060	0,023
4	DRTK2 OT2	0,0082	0,0208	0,0005	0,0082	0,024
5	DRTK2 OT3	0,0093	0,0186	0,0048	0,0060	0,022
6	CROPOS	0,0013	0,0177	-0,0044	0,0014	0,018
7	STONEX	-0,0018	0,0149	0,0032	0,0025	0,016
		ODSTUPANJE (%)				
1	UAV GNSS	1,57	10,74	1,62	6,27	
2	DRTK2	1,71	7,84	0,09	2,25	
3	DRTK2 OT1	3,56	9,51	1,09	3,31	
4	DRTK2 OT2	3,14	10,00	0,13	4,56	
5	DRTK2 OT3	3,59	8,92	1,34	3,33	
6	CROPOS	0,49	8,52	-1,24	0,76	
7	STONEX	-0,69	7,18	0,87	1,42	

Ako se promatra mjera postotne pogreške (PE) sva tri načina RTK pozicioniranja (mrežna korekcija - CROPOS, STONEX S10 korekcija te D-RTK 2) bilježe PE <5% za tri od četiri testirana objekta (Tablica 18. - zelena boja). Naime, jedini objekt gdje je postotna pogreška veća od 5% je laminat2 (Tablica 18. - crvena boja). Razlog tome su morfometrijska obilježja lokacije na koju je laminat postavljen. Naime, prvi laminat je postavljen na zaravnjen prostor na samom vrhu jaruge, dok je drugi laminat smješten na kosi, bočni dio jaruge prosječnog nagib od čak 27,1°.

5.6 Mogućnosti primjene izravnog georeferenciranja

Mnogobrojni problemi i prirodne katastrofe sve češće zahvaćaju razne dijelove Zemlje te zahtijevaju brze intervencije i odgovarajuće djelovanje. Promjena klime rezultirala je povećanjem broja vremenskih ekstrema u svijetu, predstavljajući suvremene probleme na lokalnoj i globalnoj razini (Hosseinzadehtalaei i dr., 2020, Prikryl i dr., 2021, Gralepoisi, 2020, Quan, 2021, Lee i dr., 2021). Naime, topografski podaci su značajan resurs brojnim znanstvenim disciplinama i djelatnostima, a geoznanostima oni predstavljaju temelj u takvim istraživanjima (Bertin i dr., 2020). Točne i pouzdane informacije o geografskom prostoru dobivaju se pomoću geoprostornih tehnologija (Marić i dr., 2019), temeljenih na primjeni bespilotnih letjelica (UAV). Primjena klasičnog UAV fotogrametrijskog pristupa temeljenog na orijentacijskim točkama (OT) i aerotriangulaciji (AT) zbog svojih ograničenja nije prikladna za primjenu u područjima koja su nedostupna, rizična ili zahvaćena katastrofom. Dugotrajnost procesa fotogrametrije i nemogućnost postavljanja OT zahtijeva primjenu metode izravnog georeferenciranja (IG) (Ekaso, 2018).

Izravno georeferenciranje široko je primjenjiva metoda u mnogim znanstvenim područjima. Primjena u arheološkim istraživanjima (Themistocleous, 2017, Hasting, 2019, Vidalis-Kelagiannis i dr., 2021), šumarstvu (Hu i dr., 2021, Torresan i dr., 2017, Diez i dr., 2021), studijama o životinjskim populacijama (Guo, 2018, Warembourg i dr., 2020, Eikelboom i dr., 2019), preciznoj poljoprivredi (Tsouros i dr., 2019, Deng, 2018, Rani i dr., 2020), slatkovodnim i morskim sustavima (Ventura i dr., 2018, Gooday i dr., 2018), prometu (Elloumi i dr., 2018, Outay i dr., 2020), rekonstrukciji prometnih nesreća (Liu i dr., 2019, Amin i dr., 2020, Pádua i dr., 2020), hitnim slučajevima (Boccardo i dr., 2015, Rodriguez i dr., 2006), infrastrukturi (Shakhatreh i dr., 2019) samo su neki od primjera korištenja metode IG-a.

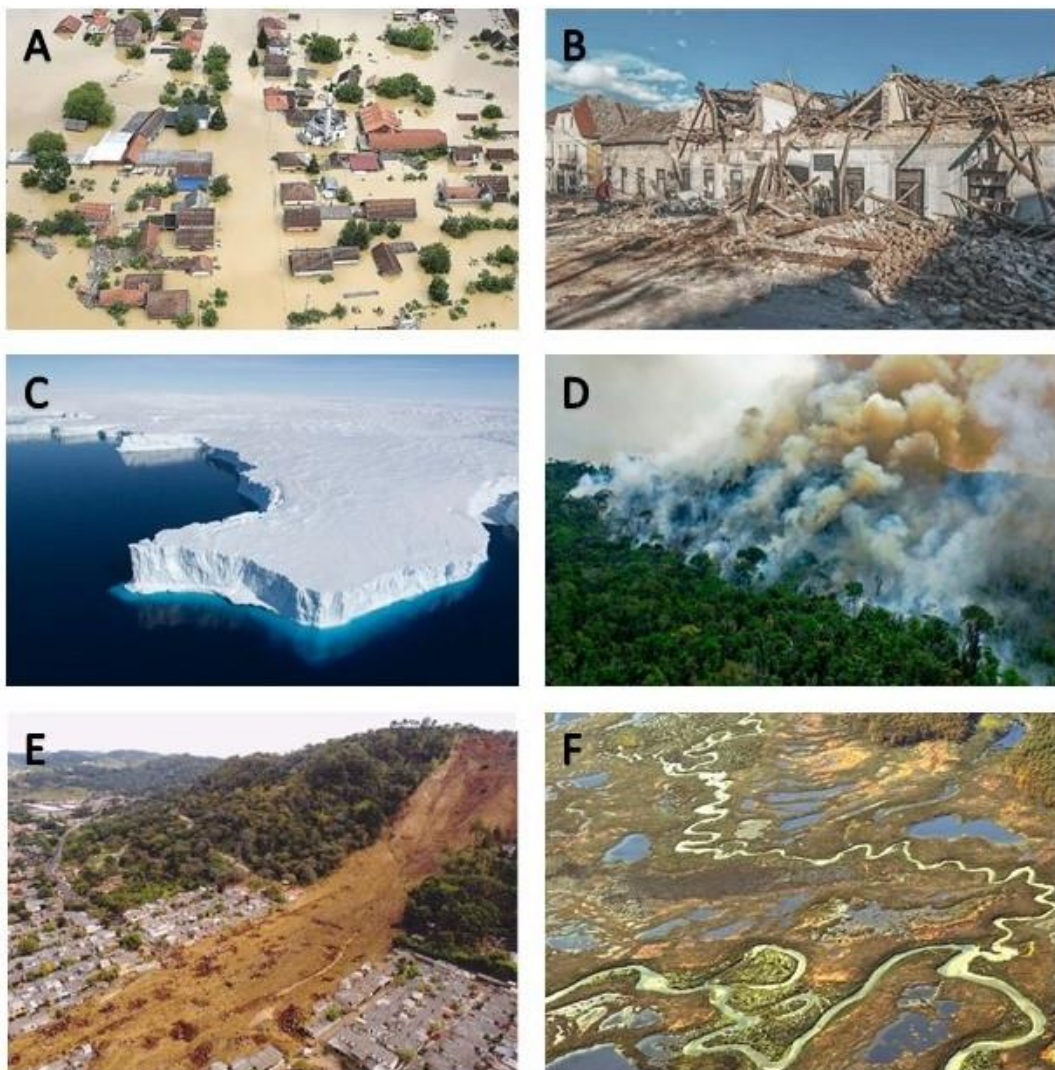
Primjena metode izravnog georeferenciranja iznimno je važna za geoznanosti. Prirodne prijetnje (oluje, poplave, klizišta, požari, potresi, tsunami, lavine) i ostali izvanredni događaji

ugrožavaju ljudske živote, degradiraju infrastrukturu i okoliš. Navedeno zahtijeva primjenu IG-a za brzi i učinkoviti pronalazak prikladnog rješenja u specifičnim okolnostima u vrlo kratkom vremenu. Stoga je nužno primjenjivanje metode IG-a za praćenje poplava (Ekaso, 2018, Weintrit i dr., 2018), klizišta (Fernández i dr., 2015), potresa, analizu vulkana (Wakeford i dr., 2019, Rodgers i dr., 2019, Brighenti i dr., 2021), rano uočavanje požara i opožarenih prostora (Syetiawan i dr., 2020, Nguyen, 2021, Sudhakar i dr., 2020), praćenje procesa u krajoliku (Green i dr., 2019, Tripolitsiotis i dr., 2017, Zhao i dr., 2018), geomorfološka istraživanja (Tilly i dr., 2016, Cook, 2017, Xiang i dr., 2018), istraživanje obalnih područja (Nikolakopoulos i dr., 2017, Burdziakowski i dr., 2020, Bertin i dr., 2020), praćenje deforestacije i reforestacije, generiranje modela zemljišnog pokrova (Al-Najjar i dr., 2019, Natesan i dr., 2018, Sarron i dr., 2018).

Jednostavna i brza obrada podataka kod IG-a omogućava pravovremeno identificiranje, praćenje i sprječavanje prirodnih prijetnji, ali i brzi pronalazak rješenja na posljedice katastrofe (Weintrit i dr., 2018). Točni položaj i orijentaciju u stvarnom vremenu ključno je poznavati u uvjetima prirodnih katastrofa, jer one zahtijevaju hitne intervencije. Brzina prikupljanja podataka s velikom točnošću glavna je karakteristika IG pristupa. Dvije su korisnosti ovog pristupa: upotreba UAV fotografija izravno s GNSS-RTK podacima te obrada fotografija za daljnje analize. Visokorezolucijske UAV fotografije i GNSS-RTK podatci mogu se koristiti od trenutka prikupljanja fotografija, za hitno postupanje nakon katastrofe. Razmjeri katastrofe procjenjuju se na temelju generiranih modela. Analizom dobivenog modela moguće je generirati karte opasnosti rizičnih područja, izraditi strategije za ublažavanje i procjene oporavka od katastrofe. Metoda IG-a omogućava nadziranje područja zahvaćenog prirodnom prijetnjom u stvarnom vremenu i brzu intervenciju (npr. akciju spašavanja) (Ekaso, 2018).

Sprječavanje nastanka poplava (Slika 41A) moguće je primjenom metode IG-a čime se identificira potencijalna opasnost, štiti rizično područje te osigurava upravljanje u trenutku kriznog događaja (Weintrit i dr., 2018). Budući da je niska osobna percepcija o pluvijalnim poplavama kao i razumijevanje o međudjelovanju procesa koji uzrokuju poplave, nužne su dugoročne strategije. Identificiranje rizika od pluvijalnih poplava u stvarnom vremenu, pomoću kartografskih prikaza, od primarne je važnosti zbog kratkog vremena za upozorenje. Poduzimanje mjera opreza važno je za sprječavanje nastanka moguće štete uzorkovane poplavama (Netzeli dr., 2021) – spašavanje života, imovine, infrastrukture i gospodarstva. Ciljane informacije osiguravaju upravljanje rizicima od poplava u stvarnom vremenu s velikom točnošću i pouzdanošću. Pristup usmjerava pravodobne intervencije hitnih službi (Salmoral i dr., 2020). Sustavni nadzor nasipa rijeka bitan je u svim fazama upravljanja (prevencija,

odgovor i procjena posljedica). Prikupljanje takvih podataka korištenjem napredne tehnologije u kombinaciji daljinskih istraživanja, uključujući primjenu metode IG-a, proveli su Weintrit i dr. (2018). Budući da postavljanje OT uključuje terensko mjerenje, a naknadna obrada podataka i orijentacija fotografija zahtijeva dodatno vrijeme, takvi postupci su neprihvatljivi u izvanrednim okolnostima. Primjena metode izravnog georeferenciranja predstavlja najučinkovitije rješenje u slučajevima kada su prostorni podatci potrebni odmah. Dakle, nužno je isporučiti točne i kvalitetne prostorne informacije u stvarnom vremenu, što je brže moguće. Točna procjena stanja nasipa na rijekama te procjena od opasnosti važna je radi generiranja modela i karata opasnosti i rizika. Navedeni podaci važni su za i daljnja hidrološka istraživanja. Nadležne institucije i službe tako raspolažu s točnim podacima na terenu, unutar jednog sustava. Razvijanje sustava nadzora nasipa primjenom metode IG/UAV i satelitskih snimki osigurava praćenje prijetnje u stvarnom vremenu te upravljanje u kriznim situacijama (Weintrit i dr., 2018).



Slika 41. Nedostupna i rizična područja

Metodu izravnog georeferenciranja ključno je primijeniti u područjima koja su pogođena potresima (Slika 41B) i požarima (Slika 41D), budući da postavljanje OT nije sigurno u razorenom gradu od potresa ili na opožarenom području.

Područja oštećena klizištima (Slika 41E) zahtijevaju hitne intervencije, što se također postiže metodom IG-a, koja osigurava brzu analizu i kvantificiranje stupnja oštećenja uslijed nastanka klizišta (utvrđivanjem zahvaćene površine). Intenzivno istraživanje mjesta pogođenog katastrofom potrebno je istražiti na vrijeme (Kim i dr., 2019).

Praćenje i proučavanje ledenjaka (Slika 41C) na mikrorazini praktički je nezamislivo bez UAV-a. Primjenom IG pristupa istražuju se promjene na površini ledenjaka. Utvrđuje se brzina kretanja leda unutar područja istraživanja, pritom se naglašava važnost praćenja i analize različitih pukotina na ledenjacima, u stvarnom vremenu. Nemogućnost je korištenja orijentacijskih točaka zbog sigurnosnih razloga (širenje pukotina) i nepostojanja nepomičnih površina ledene ploče. Primjena izravnog georeferenciranja u ovom slučaju predstavlja najprikladnije rješenje (Bliakharskii i dr. 2019).

Primjena IG-a važna je i u praćenju obalnih područja za morfološke promjene na plažama – erozija, sedimentacija, opasnim i krhkim ekosustavima – močvarna područja, tresetišta (Slika 41 – F), erozijskim liticama, pješćanim dinama i sl. Metoda IG-a važna je za redovito praćenje niza okolišnih promjena (Bertin i dr., 2020).

5.7 Savjeti u procesu izvođenja izravnog georeferenciranja

Prolaskom kroz proces montiranja cijelog sustava za izravno georeferenciranje koji uključuje UAV *Matrice 210 RTK V2*, kameru s objektivom *Zenmuse X7 16 mm* i mobilnu stanicu *D-RTK 2*, te proces fotogrametrijske obrade različitih načina rada, dobio se određeni uvid u čimbenike koji mogu utjecati na točnost rezultata. U nastavku teksta je izdvojeno nekoliko savjeta koje mogu povećati točnost rezultata te olakšati proces snimanja.

- Snimati u idealnim vremenskim uvjetima.

(Ako se želi dobiti osigurati maksimalno dobri rezultati preporučuje se snimanje u idealnim vremenskim uvjetima. Naime, kroz proces fotogrametrijske obrade utvrđeno je da pojačani nalet vjetra, s obzirom da je snimanje izvršeno na lokaciji koja je izrazito izložena buri, može utjecati na točnost pozicioniranja kamere. Naime, iako, je brzina puhanja vjetra bila ispod 5 m/s, što je prema službenim specifikacijama značajno ispod granice maksimalne otpornosti na vjetar *Matrica 210 RTK V2*, koja iznosi 12 (m/s),

ipak je zbog naleta bure na nekim lokacijama u misiji točnost pozicioniranja bila ispod centimetarske razine. Nadalje, preporučuje se snimanje u vrijeme manje naoblake.)

- Proširiti obuhvat istraživanja ili podesiti *margin* opciju.

(Kroz izvješća izvedena u Agisoft Metashape-u utvrđeno je da su pogreške u pozicioniranju kamere bila najveće na samim rubovima misija. Navedeno se događa zbog naglog usporavanja i zakretanja UAV-a prije ulaska u novi profil. Ako se ove fotografije u procesu obrade izbrišu zbog velike pogreške pozicioniranja neće biti moguće izvođenje gustog oblaka točaka ili dodavanja OT-a na njima ako su označene. S ciljem izbjegavanja navedenih problema predlaže se proširivanje prostora istraživanja i podešavanje *margin* opcije u DJI Pilot-u.)

- Prikupiti nekoliko kontrolnih točaka (CP-a).

(Ova studija slučaja je pokazala da korištenje same D-RTK 2 ne osigurava centimetarsku, već decimetarsku točnost. Dakle, ako se želi osigurati apsolutna centimetarska točnost bitno je koristiti jedan do druga dva načina rada: korekciju koordinata koristeći drugi visoko precizni GNSS prijamnik ili mrežne NTRIP korekcije. Ipak, zbog kontrole kvalitete modela svakako se predlaže prikupljanje barem nekoliko kontrolnih točaka).

6. ZAKLJUČAK

U radu su testirana tri načina rada izravnog georeferenciranja koristeći sustav *Matrice 210 RTK V2* i *D-RTK 2* mobilnu antenu. Izvršena je procjena apsolutne i relativne točnosti fotogrametrijskih modela kroz označavanje i prikupljanje orijentacijskih/kontrolnih točaka (n=10) te izračun postotne pogreške (PE) procijenjene površine odabranih objekata

H1 je POTVRĐENA.

Izračunom ukupne pogreške utvrđeno je da dva (mreža NTRIP korekcija - CROPOS i korekcija STONEX S10) od tri testirana načina rada RTK pozicioniranja imaju centimetarsku razinu točnosti. Utvrđeno je da točnost izravnog georeferenciranja koristeći *Matrice 210 RTK V2* i mobilnu stanicu *D-RTK 2* ovisi o odabranom načinu rada. Navedene dvije metode daju slične rezultate što je očekivano s obzirom na to da STONEX S10 koristi CROPOS sustav baznih stanica. Treći način RTK pozicioniranja gdje D-RTK sama određuje svoju lokaciju generira veliku apsolutnu pogrešku. Ta pogreška nije iznenađujuća ako se promotre razlike u koordinatama lokacije mobilne stanice koju je D-RTK 2 sama očitala te onima očitanim STONEX-om S10.

H2 je DJELOMIČNO POTVRĐENA.

Sva tri načina RTK pozicioniranja bilježe PE manju od 5% za tri od četiri testirana objekta. Međutim, jedini objekt gdje je postotna pogreška veća od 5% je *Laminat2* koji je smješten na kosi, bočni dio jaruge velikog nagiba.

H3 je POTVRĐENA.

Visinske razlike između DEM-ova izvedenih izravnim georeferenciranjem te referentnog modela izvedenog klasičnim fotogrametrijskim pristupom su najveće na strmim, rubnim stranama jaruge.

H4 je POTVRĐENA.

Dodavanje manjeg broja OT-a u procesu izravnog georeferenciranja poboljšalo je ukupnu točnost modela. Rekonstruiranom modelu izvedenom izravnim georeferenciranjem koristeći D-RTK 2 dodan je manji broj OT-a s ciljem utvrđivanja utjecaja na točnost modela. Ukupna pogreška modela dodavanjem orijentacijskih točaka je značajno opala.

Ovim radom je utvrđeno da se testirani UAV sustav za izravno georeferenciranje može koristiti u širokom spektru geografskih znanosti i drugih disciplina gdje se zahtjeva apsolutna i relativna centimetarska točnost različitih modela.

7. LITERATURA

- 1) Agisoft Metashape (2019). User Manual. Professional Edition, Version 1.5.
- 2) Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., López, J. S. H., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry. *Measurement*, 121, 127-138.
- 3) Albertz, J. (2007). A look back. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(5), 504-506.
- 4) Albertz, J., & Wiedemann, A. (1995). From analogue to digital close-range photogrammetry. *First Turkish-German Joint Geodetic Days*, 245-253.
- 5) Al-Najjar, H. A., Kalantar, B., Pradhan, B., Saeidi, V., Halin, A. A., Ueda, N., & Mansor, S. (2019). Land cover classification from fused DSM and UAV images using convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 11(12), 1461.
- 6) Alonzo, M., Dial, R. J., Schulz, B. K., Andersen, H. E., Lewis-Clark, E., Cook, B. D., & Morton, D. C. (2020). Mapping tall shrub biomass in Alaska at landscape scale using structure-from-motion photogrammetry and lidar. *Remote Sensing of Environment*, 245, 111841.
- 7) Amin, M. M., Abdullah, S., Mukti, S. A., Zaidi, M. M., & Tahar, K. N. (2020). Reconstruction of 3d Accident Scene from Multirotor Uav Platform. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 451-458.
- 8) Anders, N., Smith, M., Suomalainen, J., Cammeraat, E., Valente, J., & Keesstra, S. (2020). Impact of flight altitude and cover orientation on Digital Surface Model (DSM) accuracy for flood damage assessment in Murcia (Spain) using a fixed-wing UAV. *Earth Science Informatics*, 1-14.
- 9) Anderson, K., Westoby, M. J., & James, M. R. (2019). Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences.
- 10) ASPRS, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
- 11) Awange, J. L., & Kiema, J. B. K. (2013). Fundamentals of photogrammetry. In *Environmental Geoinformatics* (pp. 157-174). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 12) Aziz, N. H., Ahmad, A., & Ibrahim, N. F. (2014). Static Positioning Technique For Ground Control Point Determination For Precise Mapping Using Unmanned Aerial System. *Jurnal Teknologi*, 71(5).
- 13) Barrie, J. K. (1961). The adjustment of aerial triangulation (planimetry) Part 1. Adjustment by means of an analogue computing system. *Cartography*, 4(2), 47-54.
- 14) Barton, J. D. (2012). Fundamentals of small unmanned aircraft flight. *Johns Hopkins APL technical digest*, 31(2), 132-149.
- 15) Bertin, S., Levy, B., Gee, T., & Delmas, P. (2020). Geomorphic change detection using cost-effective structure-from-motion photogrammetry: Evaluation of direct georeferencing from consumer-grade UAS at Orewa beach (New Zealand). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 86(5), 289-298.
- 16) Bethel, D. J. (1990). Digital image processing in photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 13(76), 493-504.
- 17) Bláha, M., Eisenbeiss, H., Grimm, D., & Limpach, P. (2011). Direct georeferencing of UAVs. In *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)* (Vol. 38, pp. 131-136). Copernicus.

- 18) Bliakharskii, D. P., Florinsky, I. V., & Skrypitsyna, T. N. (2019). Modelling glacier topography in Antarctica using unmanned aerial survey: assessment of opportunities. *International Journal of Remote Sensing*, 40(7), 2517-2541.
- 19) Boccardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F. G., & Lingua, A. (2015). UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications. *Sensors*, 15(7), 15717-15737.
- 20) Brighenti, F., Carnemolla, F., Messina, D., & De Guidi, G. (2021). UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: the case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(9), 2881-2898.
- 21) Buonanno, M. (2019): D-RTK2 - User Notes - rev_200417, CNR-ISAFOM, Italy.
- 22) Burdziakowski, P., Specht, C., Dabrowski, P. S., Specht, M., Lewicka, O., & Makar, A. (2020). Using UAV photogrammetry to analyse changes in the coastal zone based on the sopot tombolo (Salient) measurement project. *Sensors*, 20(14), 4000.
- 23) Burns, J. H. R., Delparte, D., Gates, R. D., & Takabayashi, M. (2015). Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3, e1077.
- 24) Burnside, C. D. (1995). The photogrammetric society analogue instrument project: a fifth extract. *The Photogrammetric Record*, 15(86), 251-261.
- 25) Carbonneau, P. E., & Dietrich, J. T. (2016). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), 473-486.
- 26) Chen, J., Mora, O. E., & Clarke, K. C. (2018). ASSESSING THE ACCURACY AND PRECISION OF IMPERFECT POINT CLOUDS FOR 3D INDOOR MAPPING AND MODELING. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
- 27) Chiang, K. W., Tsai, M. L., & Chu, C. H. (2012). The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications. *Sensors*, 12(7), 9161-9180.
- 28) Child, S. F., Stearns, L. A., Girod, L., & Brecher, H. H. (2021). Structure-From-Motion Photogrammetry of Antarctic Historical Aerial Photographs in Conjunction with Ground Control Derived from Satellite Data. *Remote Sensing*, 13(1), 21.
- 29) Chudley, T. R., Christoffersen, P., Doyle, S. H., Abellan, A., & Snooke, N. (2019). High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *The Cryosphere*, 13(3), 955-968.
- 30) Ciceli, T. (2007). Kalibracija digitalne kamere FUJI FinePIX S2 Pro. *Geodetski list*, 61(1), 41-59.
- 31) Conforti, M., Mercuri, M., & Borrelli, L. (2021). Morphological Changes Detection of a Large Earthflow Using Archived Images, LiDAR-Derived DTM, and UAV-Based Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13(1), 120.
- 32) Cook, K. L. (2017). An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278, 195-208.
- 33) Coulombe, A. (2016): Geography word of the week: photogrammetry, <https://www.canadiangeographic.ca/article/geography-word-week-photogrammetry>, March 19, 2021.
- 34) Cramer, M., Stallmann, D., & Haala, N. (2000). Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/1; PART 3), 198-205.

- 35) Crawford, A. J., Mueller, D., & Joyal, G. (2018). Surveying drifting icebergs and ice islands: deterioration detection and mass estimation with aerial photogrammetry and laser scanning. *Remote Sensing*, 10(4), 575.
- 36) Danilov, A. S., Smirnov, U. D., & Pashkevich, M. A. (2015). The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV. *Russian journal of ecology*, 46(1), 14-19.
- 37) Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., & Yan, Y. (2018). UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 146, 124-136.
- 38) Diez, Y., Kentsch, S., Fukuda, M., Caceres, M. L. L., Moritake, K., & Cabezas, M. (2021). Deep Learning in Forestry Using UAV-Acquired RGB Data: A Practical Review. *Remote Sensing*, 13(14), 2837.
- 39) Dittrich, A., Weinmann, M., & Hinz, S. (2017). Analytical and numerical investigations on the accuracy and robustness of geometric features extracted from 3D point cloud data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 126, 195-208.
- 40) DJI, (2020): D-RTK 2 High Precision GNSS Mobile Station, https://www.vertigodrones.com/assets/images/D-RTK_2_Mobile_Station_User_Guide_v10_EN_CHS.pdf, 7.9.2021.
- 41) DJI, (2021): Matrice 210 RTK V2, <https://www.dji.com/hr/products/compare-m200-series>, 9.6.2021.
- 42) Dlesk, A., Uueni, A., Vach, K., & Pärtna, J. (2020). From Analogue to Digital Photogrammetry: Documentation of Padise Abbey in Two Different Time Stages. *Applied Sciences*, 10(23), 8330.
- 43) D'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K. D., & Ries, J. B. (2012). Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4(11), 3390-3416.
- 44) Domazetović, F., Šiljeg, A., Lončar, N., Marić, I. (2019). Development of automated multicriteria GIS analysis of gully erosion susceptibility. *Applied geography*, 112, 102083.
- 45) Državna geodetske uprava, (2017) SPECIFIKACIJA PROIZVODA SNIMANJE IZ ZRAKA I ORIJENTACIJSKE TOČKE VERZIJA 2.1
- 46) Economist. (2015). Welcome to the drone age. *The Economist*
- 47) Eikelboom, J. A., Wind, J., van de Ven, E., Kenana, L. M., Schroder, B., de Knecht, H. J., ... & Prins, H. H. (2019). Improving the precision and accuracy of animal population estimates with aerial image object detection. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(11), 1875-1887.
- 48) Ekaso, D. D. (2018). Accuracy Assessment of real-time kinematics (RTK) measurement on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing (Master's thesis, University of Twente).
- 49) Eker, R., Aydın, A., & Hübl, J. (2018). Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental monitoring and assessment*, 190(1), 28.
- 50) Elloumi, M., Dhaou, R., Escrig, B., Idoudi, H., & Saidane, L. A. (2018, April). Monitoring road traffic with a UAV-based system. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1-6). IEEE.
- 51) Esposito, G., Mastroioco, G., Salvini, R., Oliveti, M., & Starita, P. (2017). Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 103.
- 52) Fernández, T., Pérez, J. L., Cardenal, F. J., López, A., Gómez, J. M., Colomo, C., ... & Sánchez, M. (2015). Use of a light UAV and photogrammetric techniques to study the

- evolution of a landslide in Jaén (southern Spain). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3), 241.
- 53) Florinsky, I. V. (2017). An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 41(6), 723-752.
- 54) Gabrlik, P. (2015). The use of direct georeferencing in aerial photogrammetry with micro UAV. *IFAC-PapersOnLine*, 48(4), 380-385.
- 55) Garrett, B., & Anderson, K. (2018). Drone methodologies: Taking flight in human and physical geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 43(3), 341-359.
- 56) Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101-111.
- 57) Gooday, O. J., Key, N., Goldstien, S., & Zawar-Reza, P. (2018). An assessment of thermal-image acquisition with an unmanned aerial vehicle (UAV) for direct counts of coastal marine mammals ashore. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 6(2), 100-108.
- 58) Gosh, S. (1981). *History of photogrammetry*. Laval University, Canada.
- 59) Gralepois, M. (2020). What can we learn from planning instruments in flood prevention? Comparative illustration to highlight the challenges of governance in Europe. *Water*, 12(6), 1841.
- 60) Green, D. R., Hagon, J. J., Gómez, C., & Gregory, B. J. (2019). Using low-cost UAVs for environmental monitoring, mapping, and modelling: Examples from the coastal zone. In *Coastal Management* (pp. 465-501). Academic Press.
- 61) Groos, A. R., Bertschinger, T. J., Kummer, C. M., Erlwein, S., Munz, L., & Philipp, A. (2019). The potential of low-cost UAVs and open-source photogrammetry software for high-resolution monitoring of Alpine glaciers: a case study from the Kanderfirn (Swiss Alps). *Geosciences*, 9(8), 356.
- 62) Grotta, S. W. (2001). *Anatomy of a Digital Camera*.
- 63) Guo, X., Shao, Q., Li, Y., Wang, Y., Wang, D., Liu, J., ... & Yang, F. (2018). Application of UAV remote sensing for a population census of large wild herbivores—taking the headwater region of the yellow river as an example. *Remote Sensing*, 10(7), 1041.
- 64) Guptill, S. C., Morrison, J. L. (1995). Looking ahead. In *Elements of spatial data quality* (pp. 189-197). Pergamon
- 65) Hackney, C., & Clayton, A. (2015). *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Their Application in Geomorphic Mapping*. Geomorphological Techniques. British Society for Geomorphology.
- 66) Hasting, L. (2019). *Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology for Archaeology: A Case Study of Petra, Jordan*.
- 67) Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., & Willems, P. (2020). Satellite-based data driven quantification of pluvial floods over Europe under future climatic and socioeconomic changes. *Science of The Total Environment*, 721, 137688.
- 68) Hrga, M. (2018). Računalni vid. Zbornik radova Veleučilišta u Šibeniku, (1-2/2018), 207-216.
- 69) Hu, T., Sun, X., Su, Y., Guan, H., Sun, Q., Kelly, M., & Guo, Q. (2021). Development and performance evaluation of a very low-cost UAV-LiDAR system for forestry applications. *Remote Sensing*, 13(1), 77.
- 70) Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155-168.
- 71) James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., ... & Lane, S. N. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(10), 2081-2084.

- 72) James, M. R., Robson, S., & Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769-1788.
- 73) James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U. (2017): Optimising UAV topographic surveys processed with structurefrom-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51–66
- 74) Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., ... & Le Dantec, N. (2019). UAV survey of a coastal cliff face–Selection of the best imaging angle. *Measurement*, 139, 10-20.
- 75) Kim, S. S., Kim, T. H., & Sim, J. S. (2019). APPLICABILITY ASSESSMENT OF UAV MAPPING FOR DISASTER DAMAGE INVESTIGATION IN KOREA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- 76) Koldaev, A. V. (2007, February). Non-military UAV applications. In *Aero India International Seminar-2007 Edition*. Bangalore.
- 77) Konecny, G. (2003). *Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems*. cRc Press.
- 78) Kranjec, M., & Pavasović, M. (2006). Primjena inercijalnih navigacijskih sustava u geodeziji. *Ekscentar*, (8), 54-57.
- 79) Lanckton, A. H. (1969). Analytical Stereoplotter Development. *Photogrammetric Engineering*.
- 80) Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., & Rosebery, D. (2019). Low-cost UAV for high-resolution and large-scale coastal dune change monitoring using photogrammetry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 63.
- 81) Lechthaler, M. (2007). From Stars to a Map. *Pioneers of cartography-from the old ages to Mercator*. *Kartografija i geoinformacije (Cartography and Geoinformation)*, 6(7 spec.), 94-109.
- 82) Lee, D., Ahmadul, H., Patz, J., & Block, P. (2021). Predicting social and health vulnerability to floods in Bangladesh. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(6), 1807-1823.
- 83) Li, Z., Chen, J., & Baltsavias, E. (Eds.). (2008). *Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: 2008 ISPRS congress book (Vol. 7)*. CRC Press.
- 84) Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry (Vol. 1)*. Berlin: Springer.
- 85) Liu, K., Ding, H., Tang, G., Na, J., Huang, X., Xue, Z., ... & Li, F. (2016). Detection of catchment-scale gully-affected areas using unmanned aerial vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(12), 238.
- 86) Liu, X., Zou, H., Niu, W., Song, Y., & He, W. (2019, October). An approach of traffic accident scene reconstruction using unmanned aerial vehicle photogrammetry. In *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Sensors, Signal and Image Processing* (pp. 31-34).
- 87) Lončar, N. (2009). Geomorfološka regionalizacija srednjeg i južnog dijela otoka Paga. *Geoadria*, 14(1), 5-25.
- 88) Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2014). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. de Gruyter.
- 89) Magaš, D. (2011). Zemljopisna obilježja otoka Paga u funkciji upoznavanja njegove toponimije. *Toponimija otoka Paga*, 5-49.
- 90) Marić, I., Šiljeg, A., & Domazetović, F. (2019). Geoprostorne tehnologije u 3D dokumentaciji i promociji kulturne baštine–primjer utvrde Fortica na otoku Pagu. *Geodetski glasnik*, 50, 19-44.

- 91) Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porrás, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 72, 1-10.
- 92) Masiero, A., Fissore, F., & Vettore, A. (2017). A low cost UWB based solution for direct georeferencing UAV photogrammetry. *Remote Sensing*, 9(5), 414.
- 93) Meinen, B. U., & Robinson, D. T. (2020). Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111666.
- 94) Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J. J., Gavelle, E., & Borghini, S. (2015). Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of a mapping without the need for ground control points. *The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 40(1), 397.
- 95) Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 473-486.
- 96) Morgan, J. A., Brogan, D. J., & Nelson, P. A. (2017). Application of Structure-from-Motion photogrammetry in laboratory flumes. *Geomorphology*, 276, 125-143.
- 97) Nagendran, S. K., Tung, W. Y., & Ismail, M. A. M. (2018, June). Accuracy assessment on low altitude UAV-borne photogrammetry outputs influenced by ground control point at different altitude. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 169, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
- 98) Narodne novine. (2001) Pravilnik o načinu topografske izmjere i o izradbi državnih zemljovida. Br. 55/2001. Zagreb
- 99) Narodne novine. (2020) Pravilnik o načinu topografske izmjere i o izradi državnih zemljovida. Br. 15/2020. Zagreb
- 100) Natesan, S., Armenakis, C., Benari, G., & Lee, R. (2018). Use of UAV-borne spectrometer for land cover classification. *Drones*, 2(2), 16.
- 101) Nebiker, S., Annen, A., Scherrer, M., & Oesch, D. (2008). A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 37(B1), 1193-1200.
- 102) Nesbit, P. R., & Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV–SfM 3D model accuracy in high-relief landscapes by incorporating oblique images. *Remote Sensing*, 11(3), 239.
- 103) Netzel, L. M., Heldt, S., Engler, S., & Denecke, M. (2021). The importance of public risk perception for the effective management of pluvial floods in urban areas: A case study from Germany. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2), e12688.
- 104) Nguyen, H. V. (2021). FIRE DETECTION WITH UAV-BASED LIDAR USING DIRECT GEOREFERENCING APPROACH.
- 105) Nikolakopoulos, K. G., Kozarski, D., & Kogkas, S. (2017, October). Coastal areas mapping using UAV photogrammetry. In *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII* (Vol. 10428, p. 104280O). International Society for Optics and Photonics.
- 106) O'Connor, J., Smith, M. J., & James, M. R. (2017). Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data. *Progress in Physical Geography*, 41(3), 325-344.
- 107) Oniga, V. E., Breaban, A. I., & Statescu, F. (2018). Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 2, No. 7, p. 352).

- 108) Outay, F., Mengash, H. A., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. *Transportation research part A: policy and practice*, 141, 116-129.
- 109) Pacione, M. (2011). Applied geography: principles and praxis. *Hrvatski geografski glasnik*, 73(1.), 7-28
- 110) Pádua, L., Sousa, J., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Peres, E., ... & Sousa, J. J. (2020). Digital reconstitution of road traffic accidents: a flexible methodology relying on UAV surveying and complementary strategies to support multiple scenarios. *International journal of environmental research and public health*, 17(6), 1868.
- 111) Peternel, T., Kumelj, Š., Oštir, K., & Komac, M. (2017). Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. *Landslides*, 14(1), 395-406.
- 112) Pfeifer, N., Glira, P., & Briese, C. (2012). Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B7), 487-492.
- 113) Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: a brief guide. *Developments in Soil Science*, 33, 3-30.
- 114) Prikryl, P., Rušin, V., Prikryl, E. A., Šťastný, P., Turňa, M., & Zelenáková, M. (2021, August). Heavy rainfall, floods, and flash floods influenced by high-speed solar wind coupling to the magnetosphere–ionosphere–atmosphere system. In *Annales Geophysicae* (Vol. 39, No. 4, pp. 769-793). Copernicus GmbH.
- 115) Przybilla, H. J., Bäumker, M., Luhmann, T., Hastedt, H., & Eilers, M. (2020). Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for rtk-based uav photogrammetry. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 485-492.
- 116) Quan, R. (2021). Impact of future land use change on pluvial flood risk based on scenario simulation: a case study in Shanghai, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), 1-14.
- 117) Rabah, M., Basiouny, M., Ghanem, E., & Elhadary, A. (2018). Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 220-226.
- 118) Rani, S. S., Janet, J., Ramya, K. C., Sitharthan, R., Kesavan, T., & Shrivastava, S. (2020, September). UAV based mapping system for precision agriculture. In *IOP Conference series: materials science and engineering* (Vol. 937, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- 119) Rehak, M., Mabillard, R., & Skaloud, J. (2013). A micro-UAV with the capability of direct georeferencing (No. CONF, pp. 317-323). *ISPRS Archives*.
- 120) Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 38(1), C22.
- 121) Rizaldy, A., & Firdaus, W. (2012). Direct georeferencing: A new standard in photogrammetry for high accuracy mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, B1.
- 122) Rodgers, M., Malservisi, R., Connor, C., Wang, P., Connor, L., Van Alphen, R., ... & McIlrath, J. (2019, December). From beaches to volcanoes: UAV applications in geoscience using high-resolution topography and aerial magnetic surveys. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2019, pp. EP11C-2127).
- 123) Rodriguez, P. A., Geckle, W. J., Barton, J. D., Samsundar, J., Gao, T., Brown, M. Z., & Martin, S. R. (2006). An emergency response UAV surveillance system. In *AMIA Annual Symposium Proceedings* (Vol. 2006, p. 1078). American Medical Informatics Association.

- 124) Ruzgienė, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskienė, E., & Aksamitauskas, V. Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, 73, 619-627.
- 125) Salmoral, G., Rivas Casado, M., Muthusamy, M., Butler, D., Menon, P. P., & Leinster, P. (2020). Guidelines for the use of unmanned aerial systems in flood emergency response. *Water*, 12(2), 521.
- 126) Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606.
- 127) Sarron, J., Malézieux, É., Sané, C. A. B., & Faye, É. (2018). Mango yield mapping at the orchard scale based on tree structure and land cover assessed by UAV. *Remote Sensing*, 10(12), 1900.
- 128) Schenk, T. (2005). Introduction to photogrammetry. The Ohio State University, Columbus, 106.
- 129) Shakhatareh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., ... & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *Ieee Access*, 7, 48572-48634.
- 130) Skaloud, J., & Legat, K. (2008). Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2), 272-282.
- 131) Smith, M. W., J. L. Carrivick, and D. J. Quincey. "Structure from motion photogrammetry in physical geography." *Progress in Physical Geography* 40.2 (2016): 247-275.
- 132) Stott, E., Williams, R. D., & Hoey, T. B. (2020). Ground control point distribution for accurate kilometre-scale topographic mapping using an RTK-GNSS unmanned aerial vehicle and SfM photogrammetry. *Drones*, 4(3), 55.
- 133) Sudhakar, S., Vijayakumar, V., Kumar, C. S., Priya, V., Ravi, L., & Subramaniaswamy, V. (2020). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires. *Computer Communications*, 149, 1-16.
- 134) Syetiawan, A., Gularso, H., Kusnadi, G. I., & Pramudita, G. N. (2020, June). Precise topographic mapping using direct georeferencing in UAV. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 500, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.
- 135) Šiljeg, A., Barada, M., Marić, I. (2018). Digitalno modeliranje reljefa, Alfa d.d.; Sveučilište u Zadru, Zadar.
- 136) Šiljeg, A., Domazetović, F., Marić, I., Lončar, N., & Panđa, L. (2021). New Method for Automated Quantification of Vertical Spatio-Temporal Changes within Gully Cross-Sections Based on Very-High-Resolution Models. *Remote Sensing*, 13(2), 321.
- 137) Taddia, Y., Stecchi, F., & Pellegrinelli, A. (2019). Using DJI phantom 4 RTK drone for topographic mapping of coastal areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W13, 2019 ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands.
- 138) Tahar, K. N. (2013). An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 40, 93-98.
- 139) Tanathong, S., & Lee, I. (2010). Speeding up the KLT Tracker for Real-time Image Georeferencing using GPS/INS Data. *Korean J. Remote Sensing*, 26(6), 629-644.
- 140) Themistocleous, K. (2017, September). The use of UAVs to monitor archeological sites: the case study of Choirokoitia within the PROTHEGO project. In *Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017)* (Vol. 10444, p. 104441I). International Society for Optics and Photonics.

- 141) Tilly, N., Kelterbaum, D., & Zeese, R. (2016). GEOMORPHOLOGICAL MAPPING WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING AND UAV-BASED IMAGING. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- 142) Tonkin, T. N., & Midgley, N. G. (2016). Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(9), 786.
- 143) Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., ... & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2427-2447.
- 144) Tripolitsiotis, A., Prokas, N., Kyritsis, S., Dollas, A., Papaefstathiou, I., & Partsinevelos, P. (2017). Dronesourcing: a modular, expandable multi-sensor UAV platform for combined, real-time environmental monitoring. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2757-2770.
- 145) Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- 146) Turnbull, D. (1996). Cartography and science in early modern Europe: Mapping the construction of knowledge spaces. *Imago Mundi*, 48(1), 5-24.
- 147) Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2013). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738-2745.
- 148) Ventura, D., Bonifazi, A., Gravina, M. F., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2018). Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 10(9), 1331.
- 149) Vidalis-Kelagiannis, M., Kalogeropoulos, K., Grigorakakis, G., Stathopoulos, N., Petropoulos, G. P., Tsatsaris, A., & Chalkias, C. (2021). GNSS and UAV in archeology: high-resolution mapping in Cephalonia Island, Greece. In *GPS and GNSS Technology in Geosciences* (pp. 371-390). Elsevier.
- 150) Wakeford, Z. E., Chmielewska, M., Hole, M. J., Howell, J. A., & Jerram, D. A. (2019). Combining thermal imaging with photogrammetry of an active volcano using UAV: an example from Stromboli, Italy. *The Photogrammetric Record*, 34(168), 445-466.
- 151) Warembourg, C., Berger-González, M., Alvarez, D., Maximiano Sousa, F., López Hernández, A., Roquel, P., ... & Dürr, S. (2020). Estimation of free-roaming domestic dog population size: Investigation of three methods including an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based approach. *PloS one*, 15(4), e0225022.
- 152) Weintrit, B., Bakula, K., Jędryka, M., Bijak, W., Ostrowski, W., Wziątek, D. Z., ... & Kurczyński, Z. (2018). Emergency rescue management supported by UAV remote sensing data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(3/W4).
- 153) Widyaningrum, E., & Gorte, B. G. H. (2017). Comprehensive comparison of two image-based point clouds from aerial photos with airborne LiDAR for large-scale mapping. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 42, 557-565.
- 154) Xiang, J., Chen, J., Sofia, G., Tian, Y., & Tarolli, P. (2018). Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental earth sciences*, 77(6), 1-18.
- 155) Yuan, X., & Zhang, X. P. (2008). Theoretical accuracy of direct georeferencing with position and orientation system in aerial photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences*, 617-622.

- 156) Zanutta, A., Lambertini, A., & Vittuari, L. (2020). UAV photogrammetry and ground surveys as a mapping tool for quickly monitoring shoreline and beach changes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 52.
- 157) Zhang, H., Aldana-Jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2019). Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Precise Topographic Mapping. *Earth Surf. Dyn. Discuss*, 1-34.
- 158) Zhao, K., He, T., Wu, S., Wang, S., Dai, B., Yang, Q., & Lei, Y. (2018). Application research of image recognition technology based on CNN in image location of environmental monitoring UAV. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(1), 1-11.

8. IZVORI

- URL 1 <https://www.heliguy.com/products/dji-matrice-210-rtk-v2-drone>, 21.3.2021
- URL 2 https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/History_of_Photogrammetry.pdf, 2.5.2021.
- URL 3 <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Aerotriangulation>, 9.6.2021.
- URL 4 <https://www.sbg-systems.com/inertial-navigation-system-ins/>, 9.6.2021.
- URL 5 <https://www.dji.com/hr/matrice-200-series-v2/info>, 9.6.2021.
- URL 6 <https://www.dji.com/hr/downloads/software/assistant-dji-2>, 7.9.2021
- URL 7 https://www.vertigodrones.com/assets/images/D-RTK_2_Mobile_Station_User_Guide_v10_EN_CHS.pdf, 7.9.2021
- URL 8 <https://www.paybanks.ga/products.aspx?cname=dji+m210+rtk+v2+price&cid=7&xi=5&xc=20>, 8.9.2021.
- URL 9 <https://dronedj.com/2017/10/12/dji-16mm-lens/>, 8.9.2021.
- URL 10 <https://www.dji.com/hr/d-rtk-2/info>, 8.9.2021.
- URL 11 <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=10852.0>, 13.9.2021.
- URL 12 <https://forum.dji.com/thread-171841-1-1.html>, 13.9.2021.
- URL 13 https://play.google.com/store/apps/details?id=com.dji.industry.pilot&hl=en_US&gl=US, 13.9.2021
- URL 14 <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=4766.0>, 13.9.2021.
- URL 15 <https://www.aerotas.com/blog/dji-d-rtk-2-base-station>, 20.9.2021.
- URL 16 [https://www.stonex.it/wp-content/uploads/download_pdf/S10_Brochure_\[ENG\]compressed.pdf](https://www.stonex.it/wp-content/uploads/download_pdf/S10_Brochure_[ENG]compressed.pdf), 8.10.2021
- URL 17 <https://forum.dji.com/thread-181111-1-1.html>, 8.10.2021
- URL 18 <https://forum.dji.com/thread-229235-1-1.html>, 9.10.2021.
- URL 19 <https://www.dji.com/hr/zenmuse-x7/info>, 15.10.2021.
- URL 20 <https://store.dji.com/hr/product/zenmuse-x7-dl-s-16mm-nd-lens>, 15.10.2021.
- URL 21 <https://www.dji.com/hr/d-rtk-2>, 10.10.2021
- URL 22 <https://www.dji.com/hr/d-rtk-2>, 28.10.2021.

Popis grafičkih priloga

Slika 1. Reklamiranje centimetarske razine točnosti pozicioniranja (URL 22).....	10
Slika 2. (A) Smještaj otoka Paga u RH; (B) smještaj jaruge Santiš na otoku Pagu te (C) visokorezolucijski DOF snimka jaruge Santiš.....	13
Slika 3. Chevallierov fotografski stol.....	19
Slika 4. Jedna od prvih fotogrametrijskih kamera	19
Slika 5. Stereoploter.....	20
Slika 6. Primjeri zračne triangulacije (AT).....	21
Slika 7. Analitički stereoploter	22
Slika 8. Digitalni stereofotogrametrijski sustavi.....	23
Slika 9. Princip izravnog georeferenciranja.....	27
Slika 10. Bepilotna letjelica Matrice 210 RTK V2	30
Slika 11. Kamera Zennuse X7 i objektiv DS-L 16 mm.....	32
Slika 12. Mobilna stanica D-RTK 2	34
Slika 13. Montirana D-RTK mobilna stanica	36
Slika 14. Spajanje UAV sustava (Matrice 210 RTK V2 + Zennuse X7 16 mm).....	36
Slika 15. Testirana tri načina izravnog georeferenciranja	37
Slika 16. Geokodirana razlika u lokaciji fiksirane mobilne stanice D-RTK 2 očitane pomoću Stonexa S10 i D-RTK 2 (podloga DOF izveden koristeći 10 OT-a).....	39
Slika 17. Spajanje na CROPOS_VRS_RTCM31	41
Slika 18. Matrice 210 RTK V2 u misiji.....	41
Slika 19. Odabir lokacije za podizanje UAV-a (Home Point).....	42
Slika 20. Geokodirane lokacije fotografija single grid misija	43
Slika 21. Zemljišni pokrov na području jaruge.....	45
Slika 22. Lokacije prikupljenih OT-a i CP-a u odnosu na model nagiba	46
Slika 23. (A) Zaštita OT-a; (B) čišćenje OT-a te (C) označavanje OT-a	47
Slika 24. Točke označene na smeđem tlu u sredini jaruge	48
Slika 25. Prikupljanje OT-a i CP-a koristeći STONEX S10 GNSS	49
Slika 26. Primjer izvedenih veznih točaka i podudarajuće točke na susjednim fotografijama.....	52
Slika 27. Primjer gradualne selekcije veznih točaka	52
Slika 28. (A) Točno pozicioniranje markera na predviđene oznake; (B) primjeri korištenja točaka kao OT-a i CP-a.....	53
Slika 29. Primjer lokacije kamere (fotografije) lošeg pozicioniranja	54
Slika 30. Primjer izvedenog gustog oblaka točaka	54
Slika 31. (A) Procijenjena pogreška pozicioniranja kamere; (B) (ne)korištenje XYZ koordinata fotografija u orijentaciji modela.....	59
Slika 32. DOF-ovi i DEM-ovi izvedeni klasičnim pristupima (5.2.1., 5.2.2, i 5.2.3)	59
Slika 33. (A) Lokacija i pogreške OT-a; (B) procijenjene pogreške pozicioniranja kamere ..	61
Slika 34. Izvedeni DOF-ovi i DEM-ovi.....	63
Slika 35. Izvedeni DOF i DEM (NTRIP spajanje - CROPOS)	65
Slika 36. Procijenjene pogreške pozicioniranja kamere	66
Slika 37. Usporedba XYZ pogreške kroz različite načine snimanja	68
Slika 38. (1) Visinske razlike između referentnog modela i UAV GNSS, (2) CROPOS-a te DRTK-2	69
Slika 39. Visinske razlike između referentnog modela i modela izvedenog sa STONEX S10 korekcijom	70

Slika 40. Visinske razlike između referentnog modela i DRTK-2 modela s dodanim orijentacijskim točkama	71
Slika 41. Nedostupna i rizična područja	75

Popis tabličnih prikaza

Tablica 1. Karakteristike bespilotne letjelice Matrice 210 RTK V2	28
Tablica 2. Karakteristike kamere Zenmuse X7.....	31
Tablica 3. Karakteristike objektiva kamere Zenmuse X7	31
Tablica 4. Dostupni operativni načini rada D-RTK 2.....	33
Tablica 5. Karakteristike D-RTK 2 mobilne stanice	33
Tablica 6. Razlike u koordinatama mobilne stanice izmjerene s D-RTK 2 (1. način rada) i Stonex-om S10 (2. način rada).....	39
Tablica 7. Mjerenja točaka OT1A, OT1B i OT1D	55
Tablica 8. Mjerenja točaka OT1E, OT1F i OT1G	55
Tablica 9. Mjerenja točaka OT1H, OT1I i OT1J.....	56
Tablica 10. Mjerenja točaka OT1K te prosječan raspon vrijednosti X, Y i Z koordinata	56
Tablica 11. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (6 OT, 4 CP).....	57
Tablica 12. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (GNSS prijamnik - UAV)	58
Tablica 13. Točnost modela izvedenog izravnim georeferenciranjem (D-RTK2 - bazna stanica)	60
Tablica 14. Točnost različitih scenarija snimanja (D-RTK + OT)	62
Tablica 15. Točnost načina snimanja D-RTK2 korekcija STONEX S10.....	64
Tablica 16. Točnost načina snimanja mrežna NTRIP korekcija - CROPOS.....	64
Tablica 17. Sumarni podatci o točnosti svih testiranih načina RTK pozicioniranja.....	67
Tablica 18. Usporedba površine postavljenih objekata	72